



Treball fi de carrera

ENGINYERIA TÈCNICA NAVAL EN PROPULSIÓ I SERVEIS DEL  
VAIXELL



Facultat de Nàutica

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

---

# MATERIALS DE CONSTRUCCIÓ, TÈCNIQUES D'UNIÓ I MATERIALS HÍBRIDS APLICATS EN LA INDÚSTRIA NAVAL

---

Daniel Vals Leyva  
Marçal Castells Mur

Director: Jordi Torralbo Gavilán  
Realitzat en: Facultat de Nàutica de Barcelona  
Barcelona, 25 de Octubre del 2012



Voldríem dedicar aquest treball als nostres  
pares per donar-nos la possibilitat d'estudiar.

Al meu company per l'esforç.  
A la Inés per recolzar-me i patir les conseqüències del projecte.

Al meu germà pel seu suport.  
A la Belén perquè sempre va confiar en mi.

Gràcies

# ÍNDIX GENERAL

## Capítol 1. PRESENTACIÓ I HISTORIA..... 7

<b>1. Introducció.....</b>	<b>7</b>
1.1. Evolució de construcció naval segons diferents civilitzacions .....	7
1.1.1. Egipcis.....	7
1.1.2. Fenicis.....	8
1.1.3. Grecs .....	9
1.1.4. Romans.....	10
1.1.5. Nòrdics .....	11
1.1.6. Xinesos.....	12
1.1.7. Civilitzacions posteriors .....	13

## Capítol 2. TÈCNIQUES D'UNIÓ EN LA CONSTRUCCIÓ NAVAL ..... 22

<b>1. TÈCNIQUES D'UNIÓ PER DISPOSITIUS O ACCESSORIS .....</b>	<b>22</b>
1.1. Unió per claus i puntes.....	22
1.2. Unió per reblats.....	23
1.2.1. El procés .....	26
1.2.2. Característiques principals.....	29
1.2.2.1. Nombre de reblons a utilitzar .....	29
1.2.3. Avantatges i inconvenients del reblat.....	30
1.2.4. Aplicacions.....	30
<b>2. TÈCNIQUES D'UNIÓ PER SOLDADURA.....</b>	<b>33</b>
2.1. Soldadura Oxiacetilènica o Autògena .....	37
2.1.1. La flama i les seves característiques.....	38
2.1.2. Equip de funcionament .....	40
2.1.3. Metalls d'aportació.....	42
2.1.4. Fundents .....	43
2.1.5. Mètodes de la soldadura oxiacetilènica .....	44
2.1.6. Aplicacions de la soldadura oxiacetilènica .....	47
2.2. Soldadura per Arc Elèctric.....	48
2.2.1. Introducció i fonaments.....	48
2.2.2. Arc elèctric.....	49
2.3. Soldadura SMAW .....	52
2.3.1. Introducció i fonaments.....	52
2.3.2. Equip de funcionament .....	54
2.3.3. Els elèctrodes i la seva classificació .....	54
2.3.4. Posicions de soldadura per arc amb elèctrode revestit.....	59
2.3.5. Avantatges .....	61
2.3.6. Inconvenients .....	62
2.3.7. Aplicacions soldadura SMAW.....	62
2.4. Soldadura SAW .....	64
2.4.1. Introducció i fonaments.....	64
2.4.2. Equip de funcionament .....	67
2.4.3. Elèctrodes i flux .....	67
2.4.4. Avantatges .....	70
2.4.5. Inconvenients .....	71
2.4.6. Aplicacions soldadura SAW.....	71
2.5. Soldadura TIG.....	73
2.5.1. Introducció i fonaments.....	73
2.5.2. Equip de funcionament .....	74

2.5.3.	Elèctrodes soldadura TIG .....	76
2.5.4.	Posicions de soldadura TIG .....	79
2.5.5.	Avantatges .....	80
2.5.6.	Inconvenients .....	81
2.5.7.	Aplicacions soldadura TIG .....	81
2.6.	Soldadura GMAW.....	83
2.6.1.	Introducció i fonaments.....	83
2.6.2.	Material d'aportació i gas de protecció .....	84
2.6.3.	Modalitats de transferència.....	86
2.6.4.	Equip de funcionament .....	87
2.6.5.	Posicions de soldadura.....	90
2.6.6.	Avantatges .....	90
2.6.7.	Inconvenients .....	91
2.6.8.	Aplicacions de la soldadura GMAW .....	92
2.7.	Soldadura Làser.....	94
2.7.1.	Introducció i fonaments.....	94
2.7.2.	Tipus de làser .....	95
2.7.3.	Els gasos en la soldadura làser.....	98
2.7.4.	Mètodes de soldadura.....	99
2.7.5.	Equip .....	100
2.7.6.	Posicions de soldadura.....	102
2.7.7.	Avantatges .....	102
2.7.8.	Inconvenients .....	102
2.7.9.	Aplicacions de la soldadura làser.....	103
2.8.	Soldadura per Plasma.....	105
2.8.1.	Tipus de plasmes.....	106
2.8.2.	Procés de soldadura .....	106
2.8.3.	Mètodes operatius.....	107
2.8.4.	Parts de la soldadura per plasma.....	108
2.8.5.	Avantatges .....	109
2.8.6.	Inconvenients .....	109
2.8.7.	Aplicacions de la soldadura PAW .....	110
2.9.	La soldadura en la construcció naval.....	112
<b>3.</b>	<b>TÈCNiques D'UNIÓ PER ADHESIUS.....</b>	<b>115</b>
3.1.	Introducció i fonaments.....	115
3.2.	Adhesió .....	115
3.3.	Cohesió.....	117
3.4.	Avantatges dels adhesius en front als mètodes tradicionals d'unió.....	118
3.5.	Desavantatges dels adhesius en front als mètodes tradicionals d'unió.....	118
3.6.	Característiques especials de disseny de construccions unides amb adhesius 119	
3.7.	Classificació dels adhesius.....	121
3.7.1.	Adhesius pre-polimeritzats.....	122
3.7.2.	Adhesius reactius.....	123
3.7.2.1.	Adhesius reactius rígids .....	125
3.7.2.2.	Adhesius reactius tenaços .....	132
3.7.2.3.	Adhesius reactius flexibles.....	135
3.8.	Comparativa de les propietats d'alguns adhesius .....	141
3.9.	Aplicacions en la construcció naval.....	144
3.9.1.	Calafatejat de cobertes de fusta.....	146
3.9.1.1.	Igualació de juntes .....	146
3.9.1.2.	Neteja de la coberta.....	146
3.9.1.3.	Imprimació de la fusta .....	146
3.9.1.4.	Col·locació del fons de junta .....	147
3.9.1.5.	Aplicació de l'adhesiu .....	147
3.9.1.6.	Llimat de la coberta.....	147

3.9.1.7.	Acabat.....	148
3.9.1.8.	Manteniment de la coberta.....	148
3.9.2.	Enganxat de panells prefabricats de fusta a l'estructura de la coberta.....	149
3.9.3.	Enganxat d'elements antilliscants en coberta.....	149
3.9.4.	Enganxat al casc de la coberta.....	150
3.9.5.	Segellats perimetrals en portes i braços, i enganxat de mampares lleugeres al casc 153	
3.9.6.	Enganxat de protectors de cautxú al casc .....	154
3.9.7.	Segellats entre la quilla i el casc .....	155
3.9.8.	Enganxat i segellat de farratges i fixacions.....	155
3.9.9.	Enganxat de llistons i elements de fusta (escales de cabines, seients, escales principals).....	156
3.9.10.	Enganxat de cristalls.....	157
<b>4.</b>	<b>TÈCNIQUES D'UNIÓ HÍBRIDES .....</b>	<b>159</b>
4.1.	Unió Weldbonding .....	159
4.1.1.	Fonament .....	159
4.1.2.	Consideracions de procés .....	159
4.1.3.	Avantatges i inconvenients.....	160
4.1.4.	Aplicacions.....	161
4.1.5.	Equips .....	161
4.1.6.	Adhesius.....	162
4.1.7.	Pretractament .....	163
4.2.	Unió Mecànica combinada amb Unió Adhesiva.....	163
4.2.1.	Fonament .....	163
4.2.2.	Consideracions de procés .....	164
4.2.3.	Avantatges i inconvenients.....	164
4.2.4.	Aplicacions.....	165
4.3.	Unió Arc-Làser .....	165
4.3.1.	Descripció.....	165
4.3.2.	Aplicacions.....	166
4.4.	Unió MIG-Plasma .....	166
4.4.1.	Principi de funcionament.....	167
4.4.2.	Paràmetres .....	167
4.4.3.	Avantatges .....	167
4.4.4.	Inconvenients .....	168
4.4.5.	Aplicacions.....	168
4.4.6.	Equips .....	168
4.5.	Defectes.....	168
4.5.1.	Weldbonding .....	168
4.5.2.	Unió Mecànica combinada amb Unió Adhesiva.....	169
4.6.	Control de qualitat .....	170
4.6.1.	Requeriments de qualitat.....	170
4.6.2.	Monitorització i control de la qualitat .....	170
4.6.3.	Assajos destructius .....	170
4.6.4.	Assajos no destructius .....	171
<b>Capítol 3.</b>	<b>MATERIALS HÍBRIDS .....</b>	<b>172</b>
<b>1.</b>	<b>Materials Híbrids .....</b>	<b>172</b>
1.1.	Importància dels materials emprats en la construcció naval.....	172
1.2.	Introducció als Materials Híbrids.....	173
1.2.1.	Matrius orgàniques .....	174
1.2.2.	Fibres .....	175
1.2.2.1.	Fibra de vidre.....	178
1.3.	Laminatge Fibra-Metall.....	188
1.3.1.	Malecon©.....	191

1.3.1.1. Problemes que planteja l'ús de materials híbrids. Avantatges e inconvenients del Malecon©.....	192
1.3.1.2. Aplicacions del Malecon©.....	197

<b>CONCLUSIONS .....</b>	<b>198</b>
--------------------------	------------

<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>201</b>
---------------------------	------------

1. Recursos.....	201
1.1. Llibres de consulta .....	201
1.2. Pàgines web:.....	202
1.2.1. Accessoris i soldadura .....	202
1.2.2. Materials híbrids .....	202
1.2.3. Adhesius.....	202

<b>REFERÈNCIES .....</b>	<b>203</b>
--------------------------	------------

---

## Capítol 1. PRESENTACIÓ I HISTORIA

---

### 1. Introducció

L'ésser humà ha navegat des del seu passat més remot, tot i que les proves directes més antigues corresponen al Mesolític<sup>1</sup>. No obstant això, diversos investigadors han trobat restes arqueològiques de l'ús de naus en Nova Guinea 50.000 anys abans.

Aquestes primeres embarcacions primitives, eren extremadament rudimentàries fins al punt de ser definides com troncs buidats o amarats entre sí amb pells d'animals que oferien poca seguretat i limitació de recorregut. Tot i així complien amb l'objectiu de mantenir la capacitat de flotar. En aquesta època es troben les primeres canoes, bales o assemblat de troncs o juncs.

Diferents civilitzacions posteriors, van caracteritzar les embarcacions de l'època i van aportar evolucions significatives en el món de la construcció naval. Evidentment, la base d'aquests canvis neix a partir del tipus de material empleat en les embarcacions i provoca l'aparició de noves tècniques d'unió que han anat evolucionant al llarg del temps. A continuació es destaquen les civilitzacions més importants amb els respectius canvis, pel que fa a la construcció d'embarcacions.

#### 1.1. Evolució de construcció naval segons diferents civilitzacions

##### 1.1.1. Egipcis

Els vaixells egipcis més antics que es coneixen utilitzaven una armadura de fusta coberta amb una gran taula i eren suficientment grans com per necessitar mínim 20 remers i transportar una càrrega considerable de mercaderies.

La primera font gràfica d'aquestes galeres data del 3000 a. de C., i el més probable és que els vaixells d'aquesta classe portessin utilitzant-se bastant temps. Els vaixells que il·lustren les pintures egípcies més antigues estaven equipats amb un masteler<sup>2</sup> de dos pals units per la part superior, de la qual penjaven les veles.

---

<sup>1</sup> Mesolític: període situat al final del Paleolític Superior, com a transició entre aquesta època i el període neolític, i la seva datació és aproximadament de cap el 9.000 aC fins el 6.000 aC.

<sup>2</sup> Masteler: perxa o pal menor que va sobre els principals en la major part dels velers de vela rodona i serveixen per a sostenir les gàbies, un tipus de vela.

En els models posteriors s'utilitzaven mastelers senzills i les veles s'hissaven mitjançant corrons situats a la part alta del masteler. En totes les primeres embarcacions egípcies s'aconseguia maniobrar mitjançant un o dos remes de maniobra que sobresortien a popa de l'embarcació. Quan s'utilitzava més d'un per governar, s'unien entre si i s'accionaven mitjançant una palanca de comandament o canya (de timó).

A més, hi ha evidències que demostren que es coneixen les tècniques per assemblar fustes planes per construir un casc. Utilitzaven espigues de fusta i brea per calafatar<sup>3</sup>.



Figura 1. Embarcació egípcia exposada al saló nàutic de Barcelona.

Font: <http://www.ftmassana.com>

### 1.1.2. Fenicis

Els constructors més capacitats dels temps antics van ser els de Fenícia, cap al 2000 a. de C., els quals no només van construir vaixells mercants capaços de transportar càrregues considerables, sinó també bucs de guerra majors i més efectius que qualsevol dels fabricats pels seus contemporanis, els egipcis i els egeus.

La construcció més significativa dels fenicis va ser el vaixell rodó: un buc de màniga ampla que utilitzava veles en comptes de remes i proporcionava un espai per al carregament molt major que les galeres estretes.

---

<sup>3</sup> Calafatar: acció d'introduir entre dues taules del casc de fusta una combinació d'estopa de cànem embeguda en brea a fi d'evitar l'entrada d'aigua. L'estopa de cànem és un dels noms que reben les varietats de la planta 'cànnabis sativa' i el nom de la fibra que s'obté d'elles.

Els vaixells rodons fenicis van navegar pel mar Mediterrani, pel llarg de la costa d'Àfrica i per les illes britàniques.

Els constructors de vaixells fenicis són elogiats així mateix per haver desenvolupat les galeres birrems i trirrems en les quals els remes es col·locaven en dues o tres ordres.

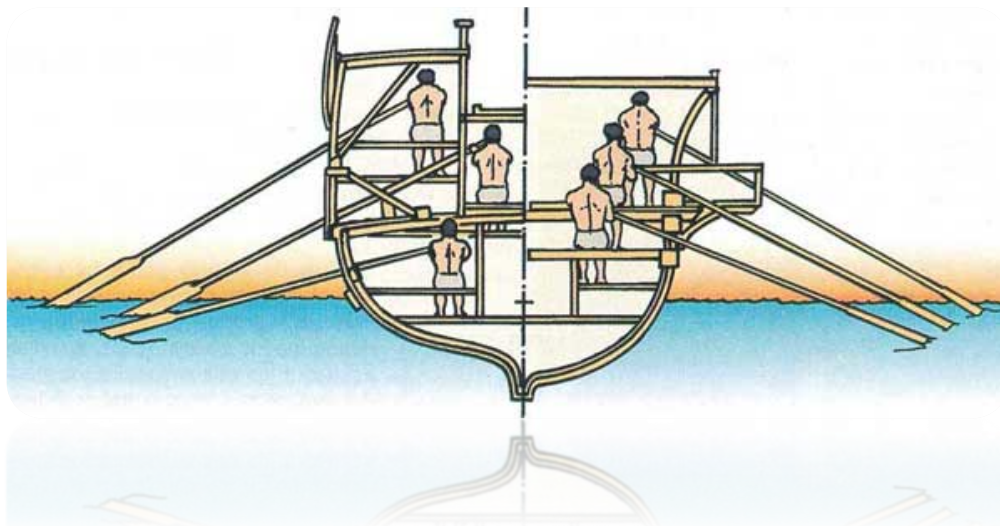


Figura 2. Possible distribució ordres de remers en una embarcació fenícia.

Font: <http://www.grijalvo.com>.

### 1.1.3. Grecs

Encara que no queden evidències, els investigadors suposen que l'armadura de les galeres gregues es realitzava utilitzant fusta corbada de forma natural, o amb colzes, de forma semblant a la utilitzada actualment en la construcció naval.

Es construïa una superestructura sobre la coberta de popa per allotjar i protegir al capità i als oficials, i en proa, la coberta s'elevava formant una estructura denominada castell de proa. Una altra característica de les naus gregues eren una sèrie de cinturons de corda que es lligaven al llarg dels costats del buc en direcció proa-popa i col·locades de tal forma que podien tirar-se mitjançant una palanca a popa de la nau.

Els cinturons tenien una doble utilitat:

- Donaven resistència al buc contra impactes ocasionats en envestir en combat contra una altra nau.
- Servien com a biga longitudinal.



Les galeres estaven també equipades amb un o dos mastelers per navegar a vela. Les veles no s'usaven quan la galera entrava en combat. La tripulació d'un buc de guerra grec es componia d'uns 220 homes aproximadament, la majoria dels quals s'ocupava dels remes.

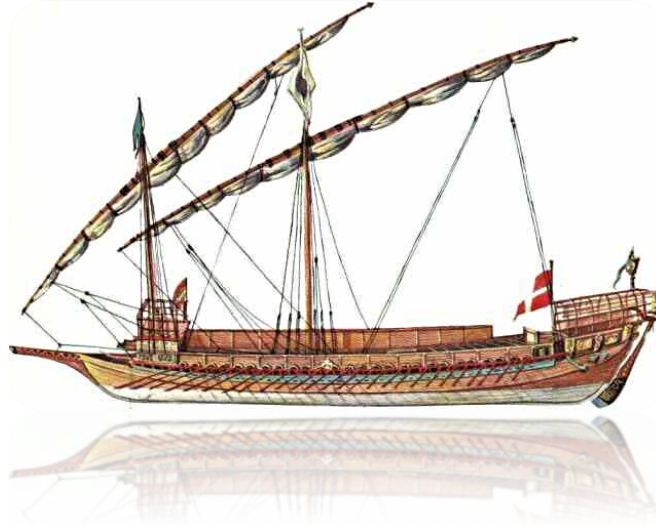


Figura 3. Galera.

Font: <http://ship-world.blogspot.com.es>

#### 1.1.4. Romans

Els romans van desenvolupar moltes classes diferents de vaixells de guerra durant el seu llarg període de dominació en el Mediterrani, sobretot galeres, les quals utilitzaven ponts per abordar els vaixells enemics i algunes portaven artilleria de catapultes.



Figura 4. Dromon.

Font: <http://www.twcenter.net>.

Per al comerç, els romans van construir vaixells de fins a 53 m d'eslora i 14 m de màniga i puntal. Es creu que van construir vaixells encara majors per transportar obeliscos d'Egipte a Roma. Aquests grans vaixells de càrrega s'aparellaven amb veles quadres<sup>4</sup> en tres pals.

L'últim desenvolupament de la nau romana de guerra va ser el 'dromon', una galera ràpida amb un o dos ordres de remos que s'utilitzava al segle V.

### 1.1.5. Nòrdics

Al mateix temps que les galeres romanes perfeccionades, es van construir les 'dracares', que navegaven en mar obert impulsats per remos i veles. Van ser desenvolupats pels pobles víkings i danesos a Escandinàvia.

El model més petit d'aquests vaixells, denominat 'snekkja', les restes dels quals es van trobar en una tomba a Noruega a la fi del segle XIX, tenia 23,8 m d'eslora, 5 m de màniga i una mica menys d'1,8 m de puntal.

El vaixell rodó o 'skuta', que era un veler que podia també ser remat, va ser el que els víkings van emprar en les seves expedicions a Groenlàndia i Islàndia, i també va ser utilitzat pels diversos reis escandinaus que van envair les illes Britàniques.



Figura 5. Dracara.

Font: <http://www.naintrading.com>

---

<sup>4</sup> Vela quadra: va ser un tipus de vela utilitzada antigament. Rep aquest nom perquè tenia forma rectangular o trapezoïdal i perquè treballava en angle recte respecte al rumb de la nau.

### 1.1.6. Xinesos

En aquella mateixa època, els xinesos van desenvolupar una de les més sòlides i manejables embarcacions que encara s'utilitza als pobles del sud-est asiàtic: el jonc. Era una gran caixa lleugera amb fons pla i mancava de tres components considerats fonamentals en la resta del món: la quilla, la roda i el codast (elements elevats en la proa i en la popa). El casc estava dividit de forma longitudinal i transversal mitjançant mampares o planxes de fusta sòlides, formant així compartiments estancs o hermètics.

Aquestes mampares, que no es van adoptar a Occident fins al segle XIX, no només proporcionaven rigidesa estructural al vaixell sinó que també ho protegeixen contra els possibles enfonsaments.

La falta de quilla es compensa gràcies a una pesat timó, muntat en l'eix central a través d'un allotjament estanc en el fons. El timó pot elevar-se o descendir.

Les veles estan compostes per estretes bandes horitzontals de fil o d'estora, assegurades cadascuna a la seva pròpia línia o escota de tal manera que cada vela pugui estendre's o plegar-se amb rapidesa.

Al segle IX d. de C. els joncs xinesos transportaven mercaderies a Indonèsia i a l'Índia. Durant el segle XV, els joncs ja navegaven fins a Àfrica oriental.



Figura 6. Jonc Xinès.

Font: <http://www.nikonistas.com>.

### 1.1.7. Civilitzacions posteriors

Els bucs en l'Europa medieval eren en general galeres romanes, però utilitzaven remos molt més llargs. Amb freqüència aquests remos mesuraven fins a 15 m i eren accionats per 7 remers cadascun.

Altres millores introduïdes en l'edat mitjana incloïen la utilització d'un timó permanent penjat del codast del buc en lloc dels timons usats pels romans. A més, els bucs que s'utilitzaven al final de l'edat mitjana es feien amb un francbord major (costats més alts des de la línia de flotació) per fer-los més adequats i resistents en mars braus.

El buc de guerra típic de l'edat mitjana va ser la galera, perfeccionada pels constructors de l'àrea mediterrània, sobretot pels constructors de Gènova i Venècia. Les galeres variaven en eslora de 30 a 60 m i, en general, s'impulsaven mitjançant 20 remos a cada costat i veles aparellades en dos o tres mastelers. A partir del segle XV les galeres s'armaven amb canons al castell de proa. En els últims models d'aquesta classe d'embarcació els canons s'instal·laven també per disparar de costat, primer, sobre la broda del buc i, a partir de llavors, a través de forats o troneres en la broda. Les galeres de major envergadura comptaven amb tripulacions de fins a 1.200 homes.

Fins al final de l'edat mitjana no hi havia una distinció clara entre bucs de vela de guerra o mercants. Les embarcacions de vela s'usaven tant com a naus de càrrega com per a la guerra, encara que els bucs de remos es dedicaven gairebé en exclusiva per a usos militars. En els començaments del segle XV, diverses nacions van començar a desenvolupar diferents tipus d'embarcacions per a la guerra i el comerç. Un vaixell mercant típic de l'edat mitjana era la carraca, buc de sòlida factura, de tres mastelers, dos veles baixes quadres en els pals trinquet i major, així com una vela llatina<sup>5</sup>. Aquests bucs estaven equipats tan sols amb un armament limitat i es dissenyaven amb preferència per portar mercaderies.

Com es evident, en els processos de fabricació de les primeres naus el material que s'utilitzava era la fusta. Principalment això era així degut a que la fusta era extensament disponible, manipulable, econòmica i pròspera en aquestes èpoques. Tot i això presentava grans dificultats d'assemblatge, limitant d'aquesta manera les dimensions d'eslora. A més, la poca resistència a l'abració provocava un deteriorament sobre el material i per aquest motiu s'utilitzaven fustes resistents al podriment com el cedre i el roure. Els elements d'unió que principalment s'utilitzaven eren cargols, claus, reblons i coles.

---

<sup>5</sup> Vela llatina: és una vela de tallant, o triangular, dissenyada per anar contra el vent.

En els segles XVIII-XIX, les naus de fusta tenien una vida útil d'aproximadament 50 anys i des del punt de vista dels materials, els cascos posseïen escassa resistència a la tracció o compressió i estaven exposats a gran desgast i deteriorament. Requerien un manteniment molt alt.



Figura 7. Restes de la roda de la fragata “Magdalena” l’any 1773-1810.  
Font pròpia, Museu Naval de Ferrol.

A través de modificacions cada vegada més complexes i perfeccionades, les naus a vela van dominar els mars fins a la invenció dels bucs a vapor, a principis del segle XIX. Durant tot aquest temps, els principis bàsics de la construcció naval van variar relativament poc encara que sí van millorar els materials i les tècniques.

A mitjans del segle XIX es va iniciar la construcció mixta fusta-ferro que va permetre un considerable augment de la grandària dels bucs i l'aparició del model clipper, llarg i esvelt, amb una proa estreta i prominent. Importants canvis d'estructura van substituir a les proes massisses i formes més robustes del passat.





Figura 8. Royal Clipper.  
Font: <http://www.boatus.com>.

Les primeres naus de ferro van aparèixer l'any 1790 i les primeres d'acer soldat cap al 1880. La superior fortalesa i homogeneïtat del ferro i la possibilitat d'assemblar-ho eficaçment van desplaçar a la fusta del lloc primordial que ocupava en la construcció naval.

Sens dubte l'acer va ser el principal culpable del naixement de la soldadura. Aquesta tècnica d'unió va revolucionar el mercat industrial i va desbancar els mètodes tradicionals d'assemblatge que fins aleshores es feien servir. Tots els processos, tècniques, equips, etc. que es van desenvolupar gràcies a la soldadura es descriuen en la segona secció del treball, així com també les principals característiques i els diferents tipus d'acers que es poden utilitzar en la construcció naval.



Figura 9. Equip antic de soldadura.  
Font pròpia, Museu Naval de Ferrol.

De forma general els principals avantatges de l'acer són: baix cost, ductilitat, resistència mecànica, treballar amb adequades dimensions, mal·leable, bones condicions per unir amb reblons o soldadura, etc. de forma que permet el laminat<sup>6</sup> en fred o en calent per la producció de planxes entre d'altres processos de conformat.

En un començament, la principal desavantatge fou la seva baixa resistència a la corrosió, per la qual cosa no és accidental que diverses de les principals companyies fabricants de pintures s'establissin amb la producció de l'acer. Aquestes no solament van oferir productes anticorrosius, sinó també antiincrustants, ja que eren problemes que es van agreujar amb els cascos ferrosos.



Figura 10. Tren d'acer laminat.

Font: <http://ingcivil-notasapuntes.blogspot.com.es>.



Figura 11. Procés de fabricació d'un buc d'acer.

Font: <http://capitankarelrulikospina.wordpress.com>.

---

<sup>6</sup> Laminatge: procés de deformació volumètrica en el qual es redueix l'espessor inicial del material treballat, mitjançant les forces de compressió que exerceixen dos corròns sobre la peça/material de treball.

Tot i que altres materials de construcció han estat desenvolupats, l'acer ha regnat durant una centúria com l'únic material important per a la construcció d'embarcacions de travessia i és el que més àmplia varietat d'aplicacions posseeix tant en vaixells com en grans estructures. La fusta però, encara s'ha utilitzat per a naus petites tal com en embarcacions de pesca, i els aliatges d'alumini per a vaixells d'alta velocitat, en les quals la reducció del pes del casc és primordial en la relació pes/potència.

Des de aleshores, existeix la necessitat de trobar nous materials per la construcció naval que siguin capaços de satisfer els requeriments de disseny i fabricació d'estructures més lleugeres, alhora que resistents, que permetin velocitats de desplaçament més elevades i menors consums energètics. L'acer presenta una sèrie de limitacions que dificulten la millora continuada en la línia marcada per a la fabricació d'estructures lleugeres, resistents i segures.

Es per això que apareixen els materials compostos. Són aquells materials que es formen per la unió de dos materials per aconseguir la combinació de propietats que no és possible obtenir en els materials originals. Aquests compostos poden seleccionar-se per aconseguir combinacions poc usuals de rigidesa, resistència, pes, rendiment a alta temperatura, resistència a la corrosió, duresa o conductivitat.

Els materials són composts quan compleixen les següents característiques:

- Estan formats de 2 o més components distingibles físicament i separables mecànicament.
- Presenten diverses fases químicament diferents, completament insolubles entre si i separades per una interfase.
- Les seves propietats mecàniques són superiors a la simple summa de les propietats dels seus components (sinergia).

Aquests materials neixen de la necessitat d'obtenir materials que combinin les propietats dels ceràmics, els plàstics i els metalls. Però malgrat haver-se obtingut materials amb unes propietats excepcionals, les aplicacions pràctiques es veuen reduïdes perquè els sistemes de fabricació són costosos i precisen de més mà d'obra especialitzada. A més, són molt sensibles al dany per impacte i poden presentar problemes de degradació de les seves propietats mecàniques. Un bon exemple és la fibra de vidre.



Encara que la fibra de vidre és un material molt resistent, està exposat a la deterioració per la intempèrie i els defectes en el casc. Aquests permeten que l'aigua del mar penetri a l'interior del laminatge a través del gelcoat que actua com una membrana semi-permeable per un procés conegut com a osmosi.

L'osmosi és un procés físic molt estès en la naturalesa i que, aplicat al casc dels vaixells de fibra de vidre, pot causar una degradació del mateix. L'aigua que penetra en el casc s'acumula en bombolles d'aire i reacciona amb substàncies presents en els materials utilitzats en la construcció. Aquestes substàncies químiques solubles i àvides d'aigua acceleren el procés d'absorció d'aquesta, augmentant la pressió osmòtica en els punts de major acumulació d'aigua.

Conseqüentment el gelcoat s'infla i es produeixen butllofes. Haurà iniciat doncs el procés de degradació del laminatge que, amb el temps, pot arribar a afeblir l'estructura del casc de forma substancial.



Figura 12. Exemple problema d'osmosi en el casc d'una embarcació.

Font: <http://www.nanaimoboatyard.ca>.

El gelcoat és un material utilitzat per proporcionar un acabat d'alta qualitat en la superfície visible d'un material compost reforçat amb fibres. Els gelcoats més comuns es basen en una resina de polièster. Moltes embarcacions marines i aeronaus es fabriquen utilitzant materials compostos amb una capa exterior de gelcoat, generalment entre 0,5 i 0,8 mm d'espessor.

Està dissenyat per ser durador, i proporcionar resistència a la degradació ultraviolada i a la hidròlisi<sup>7</sup>.



Figura 13. Aplicació gelcoat en el casc d'una embarcació.

Font: <http://www.bavaria-mallorca.com>.

Una de les alternatives als problemes que plantegen els materials compostos, és l'ús dels materials híbrids laminats fibra-metall. Combinen l'elevada resistència a l'impacte, la durabilitat i la versatilitat en els processos productius com els materials metàl·lics, la resistència i rigidesa específiques en l'adreça de les fibres i així com un bon comportament a la fatiga<sup>8</sup>, característica dels materials compostos.

El material híbrid multi capes està format per làmines metàl·liques alternant amb altres de material compost i d'adhesiu estructural, aconseguint-se prestacions en servei millorades. Degut a la vinguda d'aquests nous materials, que incorporen l'ús d'adhesius industrials, neix la necessitat de desenvolupar tècniques d'unió adhesives. La importància d'aquestes seran explicades més endavant.

Un dels materials híbrids exemple que es presenta en el darrer capítol del treball, és el Malecón©. Es tracta d'una alternativa als materials convencionals actualment en ús en el sector naval. Pretén superar algunes limitacions d'aquests materials, però sense minvar els seus avantatges de manera significativa.

---

<sup>7</sup> Hidròlisi: reacció química entre una molècula d'aigua i una altra molècula, en la qual la molècula d'aigua es divideix i els seus àtoms passen a formar part d'una altra espècie química. Pot suposar problemes d'integritat estructural en el casc d'una embarcació com l'exemple de l'osmosi.

<sup>8</sup> Comportament a fatiga: es refereix a un fenomen pel qual el trencament dels materials sota càrregues dinàmiques cícliques es produeix més fàcilment que amb càrregues estàtiques.

Aquest material laminat híbrid fibra-metall està constituït per xapes d'acer i làmines de material compost constituïdes per una matriu polimèrica reforçada amb fibra de vidre. La quantitat, espessor i orientació de cadascuna d'aquestes xapes i làmines són calculades per obtenir la rigidesa i resistència adequades a cada zona del buc. La composició del laminatge pot anar variant per adaptar el disseny del material a les necessitats estructurals de cada zona del buc o artefacte marí.

Es tracta d'un desenvolupament obtingut després de quatre anys d'investigacions, dut a terme pel Grup d'Investigació en Materials Híbrids de la Universitat Politècnica de Madrid.

La idea de partida per al desenvolupament d'aquest material ha estat l'estructura interna de les petxines i exosquelets de mol·luscs i altres animals marins. Utilitzant com a components materials naturals de propietats modestes, però combinats sàviament per la naturalesa amb una estructura jeràrquica que abasta diversos nivells d'organització (nano, micro, meso i macroscòpic), les propietats globals del material híbrid superen en diversos ordres de magnitud la dels components per separat.

Malecón© no pretén imitar aquests materials naturals sinó ser un material bioinspirat, on s'utilitzin els principis constructius observats en la naturalesa per obtenir un material sintètic d'elevades prestacions mecàniques alhora que lleuger.



Figura 14. Panell corb compost fabricat amb Malecón©.

Font: <http://oa.upm.es>.

Aquesta és una de les vessants més innovadores en la construcció naval, que no solament té aplicació en embarcacions d'esbarjo sinó que poc a poc pretén guanyar terreny als processos productius actuals de grans mercants.

Així doncs, l'evolució en el món de la construcció naval ha vingut donada per l'ús de diferents materials al llarg del temps. Conseqüentment cada canvi a suposat millores productives sobretot en les tècniques d'unió i assemblatge dels diferents elements d'una embarcació. En aquest cas la tecnologia ha jugat un paper molt important i ha permès que la recerca de millors prestacions sigui cada cop més exigent.

## Capítol 2. TÈCNIQUES D'UNIÓ EN LA CONSTRUCCIÓ NAVAL

---

### 1. TÈCNIQUES D'UNIÓ PER DISPOSITIUS O ACCESSORIS

#### 1.1. Unió per claus i puntes

La utilització de claus com a element d'unió és un dels sistemes més senzills i al que amb major freqüència es recorre per unir dues peces de fusta.

Per efectuar aquesta operació es necessita claus i martell. Al mercat existeix una gran varietat de formes, tipus i grandàries, tant de claus com de martells. Tots ells dissenyats per a aplicacions específiques.

La connexió de les diferents peces de l'estructura d'un vaixell de fusta es realitzava mitjançant unions estructurals travades i la utilització de claus, perns i claus de fusta. Aquests elements van ser utilitzats en fusteria de ribera i tots ells es galvanitzen en calent per assegurar una eficaç protecció enfront de la corrosió.



Figura 15. Fusteria de ribera.  
Font: <http://www.bienmesabe.org>.

Les puntes s'utilitzen per a unions de poca responsabilitat, els claus per a la unió de les taules del forro a les quadernes i els cargols per a la unió de les grans peces estructurals.

La punta té el cos cilíndric amb el cap pla. Les seves dimensions es definien tradicionalment d'acord a la galga París que estava formada per dues xifres del 12 al 25 i la longitud en mil·límetres. Punes típiques utilitzades en fusteria de ribera són la 19 x 80 i la 18 x 70.

El clau té el cos facetat amb quatre cares i el cap pla. Es defineix per la longitud en polzades, probablement per influència dels fabricants britànics, amb intervals de mitja en mitja polzada.

Per evitar que la punta o el clau esquerdin la fusta és bona pràctica perforar prèviament un trepant de diàmetre lleugerament inferior al corresponent de la punta o del clau. El clau emprat en fusteria de ribera es fabricava tradicionalment de forma artesanal partint d'un totxo quadrat, donant forma al capdavant mitjançant forja i escalfant a continuació l'altre extrem per fer la punta copejant a mà. A continuació es decapava i galvanitzava submergint les puntes en un recipient alimentat per llenya.

Més tard es van introduir processos de fabricació mecanitzats, però els fusters de ribera preferien els claus fabricats a mà encara que anessin més cars, i preferien també que la galvanització fos irregular perquè així el clau agafava millor en la fusta.

## 1.2. Unió per reblats

El reblat és una operació mecànica que permet la unió de xapes, o similars, de petit espessor, per mitjà de reblons.

El rebló és un pern metàl·lic, una peça de forma cilíndrica, de dimensions reduïdes, que disposa d'una vareta que sobresurt per un dels seus extrems, que s'insereix incandescent en forats prèviament practicats en les peces a unir. En ser sotmès a esforços de tracció per la màquina, crea en l'altre extrem una rebava que provoca la unió solidària d'ambdues peces.



Figura 16. Exemple rebló.  
Font: <http://upload.wikimedia.org>.

Existeixen diferents classificacions dels tipus de reblons segons la forma del cap segons la seva pròpia forma.

La norma UNE 17012 classifica els tipus de reblons denominats reblons especials segons la seva forma. La norma UNE 17003 classifica els tipus de reblons segons la forma del seu cap.

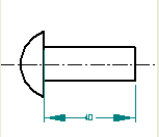
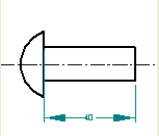
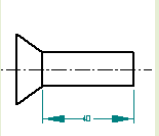
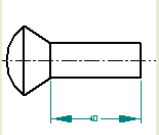
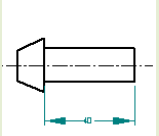
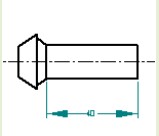
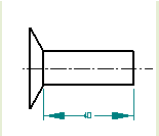
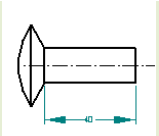
Tipus	Representació gràfica	Denominació
1		Reblons de cap esfèric
2		Reblons de cap esfèric per construccions estanques
3		Reblons de cap avellanat
4		Reblons de cap avellanat i bombada
5		Reblons de cap troncocònic
6		Reblons de cap troncocònic i avellanat
7		Reblons de cap pla i avellanat per construccions navals i estaques
8		Reblons de cap avellanat i bombada per construccions navals i estaques

Figura 17. Diversos reblons segons norma UNE 17003.

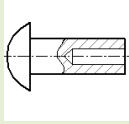

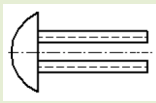
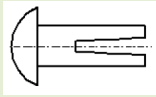
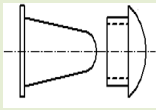

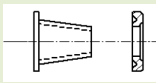
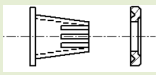
Tipus	Representació gràfica	Denominació
1		Rebló perforat
2		Rebló buit
3		Rebló tubular obert
4		Rebló entallat
5		Rebló tubular en dues parts en cap pla
6		Rebló tubular en dues parts en cap arrodonit
7		Forat amb volandera
8		Forat obert amb volandera

Figura 18. Diversos reblons segons norma UNE 17012.

Com s'han vist en la taula, apareixen dos tipus de reblons: els de cap esfèric i els de cap avellanat. Els reblons de cap esfèric tenen el cap de seient de forma bombada i existeixen dos tipus segons es requereixi estanqueïtat o no en la unió. Pel que fa als reblons de cap avellanat, permeten el seu allotjament a l'interior de les peces. Els reblons de tipus 2, 7 i 8, que s'usen per a construccions estances, tenen el cap de majors dimensions que els tipus 1, 3 i 4 respectivament.



### 1.2.1. El procés

Inicialment els vaixells d'acer es construïen solapant planxes d'acer que eren unides entre si mitjançant reblons. Mentre un operari pressiona per la part del cap del rebló, el seu company en el costat oposat expandeix l'altre extrem. El rebló, en refredar-se, es contreu estrenyent encara més les planxes.



Figura 19. Exemple xapa reblada.  
Font: otosluzrefractada.blogspot.com.es.

Al principi l'operació de reblonat es feia manualment emprant maces. Més tard es van utilitzar martells percussors hidràulics, pneumàtics o de vapor. Aquesta activitat es caracteritzava per l'intens soroll produït que causava problemes auditius als operaris.



Figura 20. Eines que s'utilitzaven per fer l'operació de reblat.  
Font pròpia, Museu Naval de Ferrol.

En els tallers de forja es produïen peces singulars tant per la seva forma com per la seva grandària que eren necessàries per a determinades unions. A més, en els tallers de ferrers de ribera (una part de les drassanes) es tallaven i preparaven les xapes del casc i la superestructura, així com altres elements. Totes aquestes peces eren posteriorment assemblades en la dàrsena<sup>9</sup>.

Les peces del vaixell i la seva superestructura s'assemblaven en la graderia. Primer es col·locava la quilla (eix longitudinal inferior del casc) i a continuació es muntaven les altres parts de l'estructura com les quadernes, mampares, la superestructura, etc.

Una vegada concloses aquestes parts es procedia al folrat de les xapes.

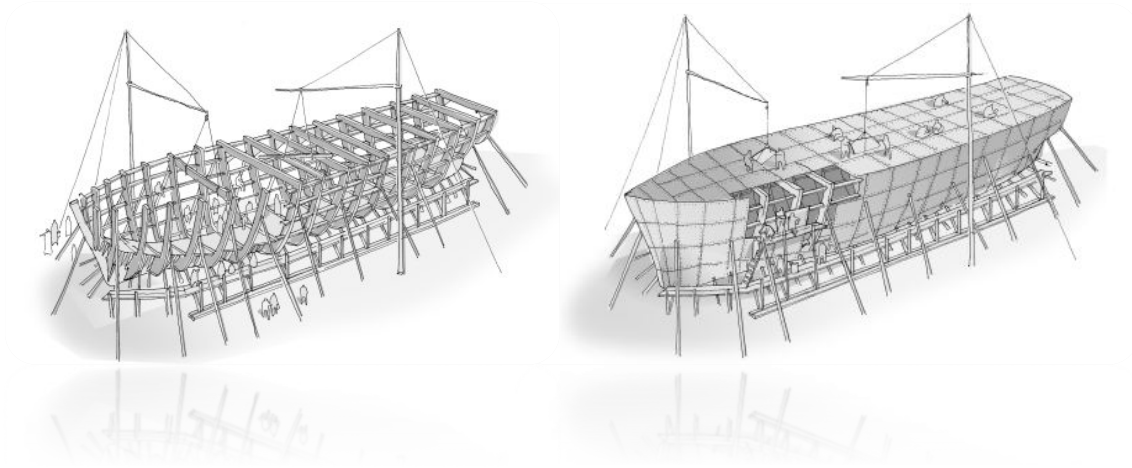


Figura 21. Folrat de les xapes.

Font: [www.hiru.com](http://www.hiru.com).

La unió de peces es realitzava a través del complex i costós sistema del reblat. S'efectuava passant els reblons pels forats fets en les peces metàl·liques i eixamplant a continuació l'altre extrem per formar així el segon cap.

---

<sup>9</sup>Dàrsena: Indret protegit artificialment en els ports, canals, etc. on les embarcacions poden dur a terme en tota seguretat les diverses operacions de càrrega i descarrega.

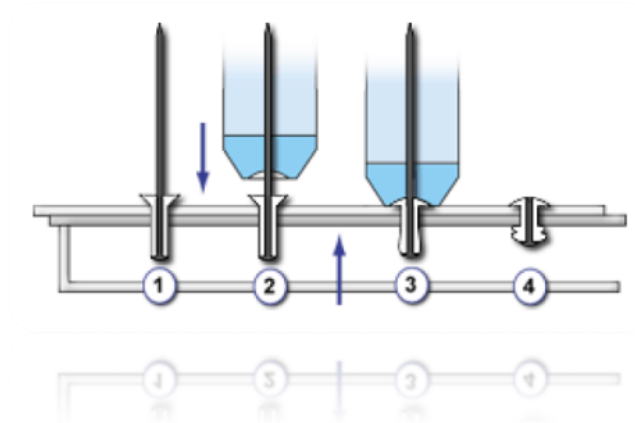


Figura 22. Seqüència de reblat.

Font: www.hiru.com.

La seqüència de reblat és: (1), realització d'un trepar de diàmetre lleugerament superior al del rebló a través de les dues peces a unir, (2) introducció del rebló, (3) deformació de l'extrem del rebló.

Aquesta operació es podia realitzar:

- **Reblat a mà:** colpejant l'extrem del rebló amb un martell lleuger .
- **Reblat estampat:** colpejant amb un martell de gran pes que es recolzava en el coll de forma d'encuny.
- **Reblat pneumàtic:** amb rapidíssims cops suaus realitzats per martells pneumàtics.

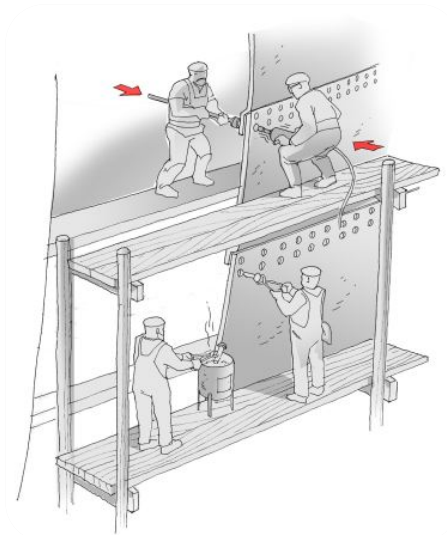


Figura 23. Reblat pneumàtic.

Font: www.hiru.com.

### 1.2.2. Característiques principals

El reblat de bona qualitat ha de complir la següent condició:

El rebló calent, en refredar-se i contreure's, ha d'estrènyer intensament les xapes per evitar tot moviment relatiu entre elles. Per tant, si els assajos han d'indicar la qualitat d'una unió reblada, no és important determinar la càrrega sota la qual es trenca la junta, sinó la càrrega a la qual comença a resultar visible el lliscament de les dues xapes. Així doncs, els reblons no treballaran a cisalla fins que la carrega que provoca el lliscament de les xapes sigui present.

Diversos experiments efectuats amb juntes reblades han posat en evidència que els esforços dels reblons, per les quals es produeix el lliscament inicial, depèn en més o menys proporció segons:

- El nombre de files de reblons.
- L'espessor de les xapes.
- Si la junta ha estat o no comprimida.

I també amb menys influència:

- La forma del cap del rebló.
- Els diferents mètodes de reblat.

#### 1.2.2.1. Nombre de reblons a utilitzar

En el disseny d'una unió o una reparació, el nombre de reblons o cargols a utilitzar ha de triar-se assumint que a cada costat de la unió han d'existir els suficients per absorbir una càrrega igual a la de la xapa. En una primera aproximació:

$$N^{\circ} \text{ reblons} = \frac{51,71LT}{S} \quad (1)$$

$$N^{\circ} \text{ reblons} = \frac{51,71LT}{B} \quad (2)$$

On:

**L** = Longitud de la xapa a la zona de l'enllaç.

**T** = Espessor de la xapa.

**S** = Resistència a cisalla del rebló o cargol en decaNewtons.

**B** = Resistència a l'aixafament del material en decaNewtons.

**51,71** constant equivalent a la resistència a la tracció de la xapa en decaNewtons/mm<sup>2</sup>.

El càlcul es realitza amb **S** o **B** depenent de quina de les dues variables pren el valor més petit.

La distància entre reblons en una fila no ha de ser inferior a tres vegades el diàmetre del rebló i per evitar el bombament de les xapes entre deu i dotze vegades.

### **1.2.3. Avantatges i inconvenients del reblat**

Els avantatges son:

- Es fabriquen en una àmplia varietat de materials i poden ser utilitzats per unir tant peces d'iguals materials o diferents, amb àmplia varietat d'espessors i sobretot amb possibilitat de muntatge en fred.
- Es poden utilitzar en diferents varietats d'acabats: electrolítics, pintats, etc.
- Els reblons és poden utilitzar per a la unió de peces que presentin les superfícies d'unió paral·leles i tinguin el suficient espai per a l'aplicació del rebló, així com de les eines necessàries.
- Els reblons poden ser utilitzats per a altres funcions, tals com a eixos d'articulació, espaiadors, contactes elèctrics, topalls, etc.

Les desavantatges son:

- La resistència a la tracció i a la fatiga és més baixa que en cargols de les mateixes dimensions.
- Càrregues de tracció elevades poden trencar la unió. Les vibracions poden afectar al destret entre les superfícies.
- Les unions reblades normalment no són hermètiques al pas de líquids ni d'aire, encara que és pot aconseguir aquest efecte mitjançant l'ocupació de segellats.
- El desmuntatge de les peces reblades, només pot realitzar-se destruint el rebló.
- Els reblons manquen de la precisió dels cargols mecanitzats.
- Els reblons de cap amagat, només poden ser utilitzats en aquells casos en què es requereixi neteja aerodinàmica.
- Els caps avellanats poden interferir amb peces adjacents mòbils.

### **1.2.4. Aplicacions**

Antigament, l'ús del rebló va ser una pràctica molt extensa en la construcció naval. La seva aplicació va aparèixer juntament amb la fabricació de vaixells per planxes d'acer, substituint la fusta.

Un exemple important de l'ús del rebló en el sector naval, va ser la construcció del Titànic i el RMS Olympic, que estaven construïts amb planxes d'acer unides per reblons de dos tipus: d'acer i de ferro forjat.

Els d'acer es van col·locar amb màquines de reblat hidràuliques en un 60% del casc del buc (les 3/5 parts del vaixell, en la secció central, on es creia que anaven a produir les màximes tensions). Les planxes estaven unides entre si per tres o quatre files de reblons.

Els de ferro forjat es van col·locar manualment en el restant 40% (les 2/5 parts del vaixell, en les seccions de proa i popa, que eren massa estretes per a les voluminoses màquines de reblat de l'època). Les planxes estaven unides mitjançant una doble fila de reblons.



Figura 24. Reblat del Titànic.

Font: <http://crucerosenuruguay.blogspot.com.es/>

En l'actualitat, els reblons són excel·lents per subjectar materials com a plàstic, teles, cuir, peces de fusta o de metall. L'ús de reblons es utilitza com un mètode per a subjecció ràpida, forta i econòmica per a una gran varietat d'aplicacions. És destaca:

- Peu/rodes giratòries ajustables.
- Components de l'automòbil.
- Compressors.
- Xassís d'ordinador.
- Frontisses de portes.
- Tallagespa.
- Cabines d'ascensor.
- Plaques de matrícula.
- Radis.
- Ancoratges de portaequipatges.

- Marcos de finestra.
- Les unions més sofisticades.
- Utensilis de cuina.
- Roba.

A més s'apliquen en la indústria aeronàutica per fixar les xapes a l'estructura de l'avió.



Figura 25. Reblat en avió.

Font: <http://interpresanoticias.blogspot.com.es>.

## 2. TÈCNIQUES D'UNIÓ PER SOLDADURA

L'estructura de la major part dels bucs és un conjunt d'elements d'acer dolç i d'acer de gran resistència. Aquest material té excel·lents propietats de ductilitat, mecanitzat i soldadura, així com la resistència que necessiten els vaixells transoceànics.

El material bàsic de la construcció naval és l'acer, que pot ser de diferents qualitats, però també s'utilitzen l'alumini i altres materials no fèrrics per exemple en el muntatge d'algunes superestructures com allotjaments de coberta i en zones determinades. A més també s'utilitzen materials especials, com acers inoxidable i galvanitzats<sup>10</sup> o aliatges de coure i níquel per protegir l'estructura de la corrosió i millorar la seva integritat. En qualsevol cas, els materials no fèrrics s'utilitzen en menor quantitat que l'acer.

L'acer utilitzat en la construcció naval es pot subdividir en tres tipus:

- Acer dolç.
- Acer d'alta resistència.
- Aliatges d'acer.

Els acers dolços presenten bones qualitats, són fàcils de produir, conformar i soldar.

Els acers d'alta resistència estan aliats amb petites quantitats d'altres elements que aporten qualitats mecàniques superiors als dels acers dolços. Aquests acers de resistència i elasticitat elevades solen rebre comercialment les denominacions HY-80, HY-100 i HY-130. Les seves propietats en quant a resistència superen a les dels acers estàndards però exigeixen tècniques de soldadura més complexes. Normalment es solden amb varetes específiques i requereixen un previ escalfament d'unions.

D'altra banda, els aliatges d'acer incorporen proporcions relativament grans d'elements com níquel, crom o manganès. L'acer inoxidable<sup>11</sup> és un bon exemple, presenta excel·lents qualitats de resistència a la corrosió però també exigeix tècniques de soldadura especials.

---

<sup>10</sup> Galvanització: procés electroquímic pel qual es pot cobrir un metall amb un altre. La funció de la galvanització és protegir la superfície del metall sobre el qual es realitza el procés.

<sup>11</sup> Acer inoxidable: és un producte metal·lúrgic que resulta d'afegir a l'acer una proporció bastant elevada de crom i níquel. La qualitat d'inoxidable no prové de cap capa protectora superficial, sinó que es deu a l'aliatge, a la mescla de metalls.



Com s'ha dit abans, tot i que la seva ocupació en la construcció naval és limitada, l'alumini ha anat guanyant posicions en la construcció de superestructures, tant en bucs militars com en bucs civils. L'alumini presenta una bona relació resistència/pes i les seves aplicacions són cada vegada més nombroses.

La construcció integral d'alumini sol reservar-se a embarcacions petites, com pesquers, iots d'esbarjo, petits bucs de passatgers, etc. A més, també és utilitzat en reparació de bucs. L'alumini s'alia amb manganès, magnesi, silici o zinc produint aliatges forts que ofereixen resistència a la corrosió i facilitats en el procés de soldadura.

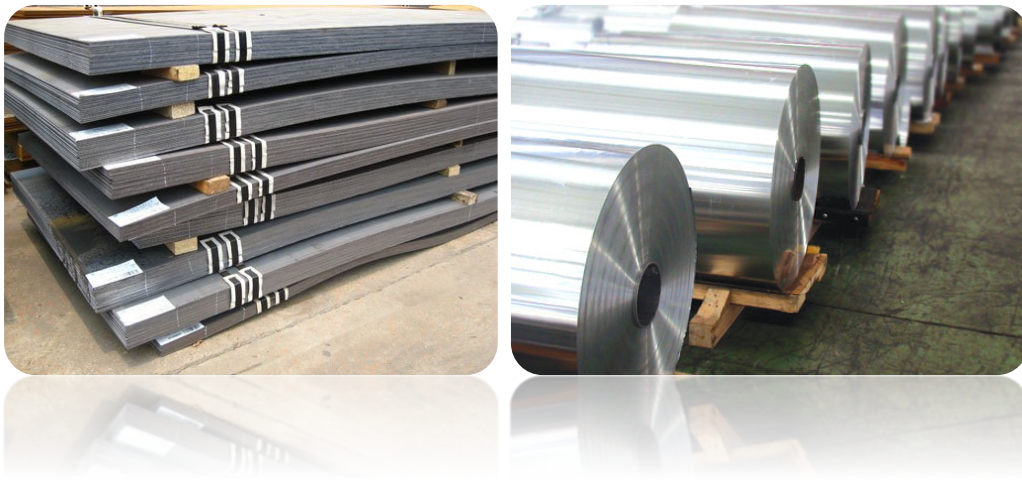


Figura 26. Planxes d'acer i bobinat d'alumini.

Font: [www.patazas.com](http://www.patazas.com), <http://www.multipaneluk.es>.

La soldadura és un procés de fabricació on es realitza la unió de dos materials a través de la fusió. Les peces són soldades fonent-se ambdues i afegint-ne un material de farciment fos que té un punt de fusió menor al de la peça a soldar. S'aconsegueix doncs, un bany de material fos (bany de soldadura) que, en refredar-se, es converteix en una unió forta.

A vegades la pressió és usada conjuntament amb la calor, o per si mateixa, per produir la soldadura. Això està en contrast amb la soldadura tova i la soldadura forta que impliquen la fosa d'un material de baix punt de fusió entre peces de treball per formar un enllaç entre ells, sense fondre les peces de treball.

Moltes fonts d'energia diferents poden ser usades per la soldadura, incloent una flama de gas, un arc elèctric, un làser, un raig d'electrons, processos de fricció o ultrasò. L'energia necessària per formar la unió entre dues peces de metall generalment prové d'un arc elèctric. L'energia per soldadures de fusió generalment prové del contacte directe amb una eina o un gas calent.

Els efectes de la soldadura resulten determinants per a la utilitat del material soldat. El metall d'aportació i les conseqüències derivades del subministrament de calor poden afectar a les propietats de la peça soldada. Cal evitar porositats i esquerdes.

Existeixen diferents criteris per classificar la soldadura i entre els més significatius es troben segons els mètodes de soldadura y segons els tipus de soldadura.

En quan als mètodes de soldadura, es troba:

- **Soldadura per fusió.** Consisteix en l'escalfament de dues peces de metall fins a aconseguir la seva unió fonent les vores d'ambdues.
- **Soldadura per pressió.** Es pot realitzar en fred o fent escalfar els metalls fins a arribar a una temperatura sota el punt de fusió i exercint una pressió que obligui a les peces a unir-se.

Segons els tipus de soldadura es té present la naturalesa dels metalls a unir:

- **Soldadura heterogènia.** S'efectua entre materials de diferent naturalesa, amb o sense metall d'aportació o entre metalls iguals, però amb diferent metall d'aportació. Pot ser tova o forta.
- **Soldadura homogènia.** Els materials que es solden i el metall d'aportació, en el cas en què existeixi, són de la mateixa naturalesa. Pot ser oxiacetilènica, elèctrica (per arc voltaic o per resistència), etc. Si no hi ha metall d'aportació, les soldadures homogènies es denominen autògenes.



Figura 27. Antigues làmpades de soldadura.  
Font pròpia, Museu Naval de Ferrol.

Figura 28. Processos de soldadura segons l'AWS<sup>12</sup>.

<sup>12</sup> AWS: són les inicials d'American Welding Society. És una organització que té l'objectiu de promoure la ciència, la tecnologia i l'aplicació de la soldadura en tots els seus diferents processos.

## 2.1. Soldadura Oxiacetilènica o Autògena

També coneguda com soldadura en flama, és un procediment de soldadura en què la unió dels metalls es dona per la fusió de les bores.

Es realitza amb un bufador alimentat d'un gas combustible i oxigen. La temperatura de la flama és de l'ordre de 3100°C fins a 3500°C, temperatura aconseguida mitjançant la reacció de combustió de l'acetilè ( $C_2H_2$ ) que resulta ser fortament exotèrmica. Aquesta es capaç de fondre tots els metalls excepte el wolframi<sup>13</sup> o tungstè.

Aquesta soldadura no es sol emprar com a procediment de prefabricació tenint l'inconvenient de ser lenta i fins i tot ineficaç, limitant el seu ús en peces de poc espessor.

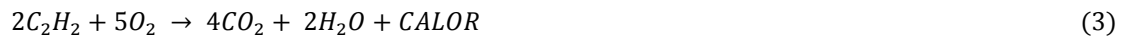
A continuació es mostra a la següent graella els gasos de combustible més comuns en l'ús de la construcció naval.

Denominació del gas	Formula química	Densitat en relació amb l'aire	$m^3$ d' $O_2$ per la combustió d' $1 m^3$ de gas	Temperatura de combustió en $O_2$ , en °C
Acetilè	$C_2H_2$	0,9056	2,5	3200
Propà	$C_3H_8$	1,53	5	2750
Hidrogen	$H_2$	0,0695	0,5	2200
Gas Natural (metà)	$CH_4$	0,56	2	2000

Figura 29. Gasos de combustible.

<sup>13</sup> Wolframi: és un element químic amb el símbol químic W i el nombre atòmic 74. És un metall gris metàl·lic sota condicions estàndards sense aliar. L'element pur té unes característiques físiques fortes, especialment el fet que té el punt de fusió més alt de tots els metalls sense aliar i el segon més alt de tots els elements després del carboni.

Un exemple és la reacció de combustió de l'acetilè<sup>14</sup> alimentat amb oxigen:



A aquest procés s'arriba a través de dues etapes: combustió incompleta i combustió completa. En la combustió incompleta té lloc la següent reacció:



I en la combustió incompleta:



### 2.1.1. La flama i les seves característiques

En la flama es distingeixen diferents zones:

- **Zona de mescla.** És la zona on es produeixen la mescla dels gasos. La proporció entre l'oxigen i el combustible dependrà del caràcter químic que es requereix en la flama i del tipus de combustible que s'utilitza.
- **Zona d'inflamació.** És la zona on la mescla s'escalfa fins la temperatura d'inflamació sense que es produeixi la combustió.
- **Zona de temperatura màxima o dard.** Es la flama utilitzada en la soldadura.
- **Plomall.** Zona de combustió secundària on es produeix la combustió dels productes obtinguts en la combustió primària a l'entrar en contacte amb l'oxigen de l'atmosfera. La flama en aquesta zona és molt oxidant i conté nitrogen procedent de la descomposició de l'aire.

---

<sup>14</sup> Acetilè: és un gas altament inflamable, una mica més lleuger que l'aire i incolor.

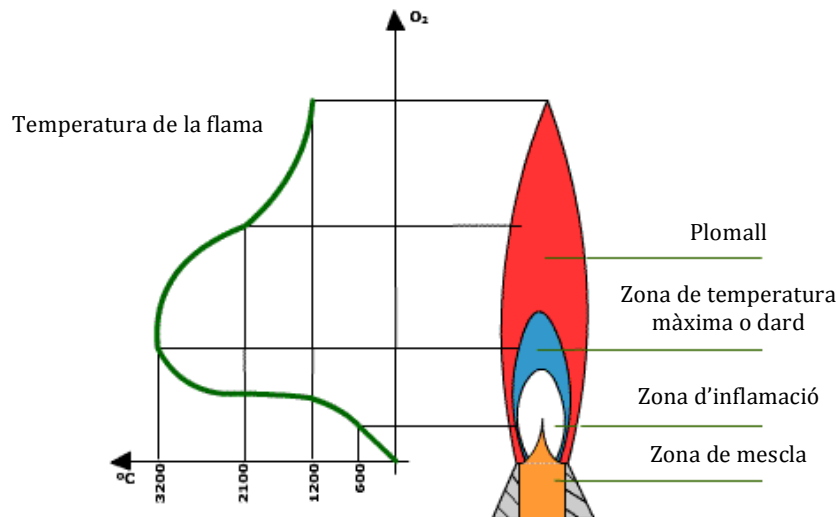


Figura 30. Flama oxiacetilènica.

Font: <http://www.monografias.com>.

La flama és fàcilment regulable ja que es poden obtenir flames estables amb diferents proporcions d'oxigen i acetilè. En funció de la proporció d'acetilè i oxigen es disposen els següents tipus de flama:

- **Flama d'acetilè pur:** es produeix quan es crema aquest en l'aire. Presenta una flama que va del groc roent taronja en la seva part final i que produeix partícules de sutge<sup>15</sup> en l'aire. No té utilitat en la soldadura.
- **Flama reductora:** es genera quan hi ha un excés d'acetilè. Partint de la flama d'acetilè pur, a mesura que augmenta el percentatge d'oxigen es fa visible una zona brillant, dard, seguida d'un plomall acetilènic de color verd pàl·lid, que desapareix en igualar-se les proporcions.

Una forma de comparar la proporció d'acetilè pel que fa a l'oxigen consisteix a comparar la longitud del dard amb el plomall acetilènic. Si aquest és el doble de gran, hi haurà per tant el doble d'acetilè. Segons la relació oxigen/acetilè la flama pot ser:

- **Flama neutra:** mateixa proporció d'acetilè que d'oxigen, és aquella ideal per soldar acer. La relació es aproximadament d'1 a 1,14. No hi ha plomall acetilènic.

<sup>15</sup> Sutge: és un terme general per a referir-se a les partícules sòlides molt petites que es produeixen quan es cremen el carbó i altres hidrocarburs combustibles.

- **Flama oxidant:** hi ha un excés d'oxigen que tendeix a estrènyer la flama a la sortida del filtre provocant una flama curta, blavosa i sorollosa. Aconsegueix les màximes temperatures. No és utilitzada en la soldadura d'acers.
- **Flama reductora:** hi ha una manca d'oxigen, mostra una flama llarga, groguenca i aconsegueix menys temperatura.

En tots els tipus de flama mencionats anteriorment, el plumall que es forma es degut a la combustió dels productes que no es van cremar en la primera etapa de la flama.

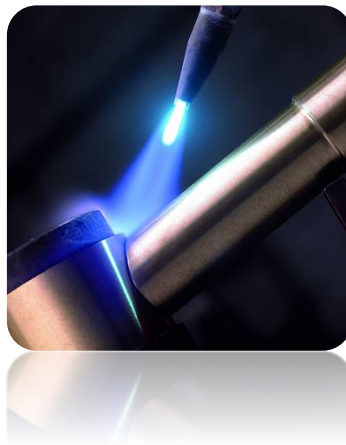


Figura 31. Flama oxiacetilènica.  
Font: <http://www.elchapista.com>

### 2.1.2. Equip de funcionament

Per dur a terme aquesta soldadura és necessari disposar del següent equip:

- Una ampolla d'acetilè dissolta en acetona que redueix el risc d'explosions indesitjables. L'ampolla va proveïda de vàlvules de seguretat, d'una clau de tancament i reducció de pressió i d'un manòmetre de control de baixa i alta pressió. Es pot utilitzar també un generador d'acetilè<sup>16</sup>.
- Una ampolla d'oxigen a gran pressió proveïda també de manòmetres de control de baixa i alta pressió, i de vàlvules de tancament i reducció. La pressió de treball s'aconsegueix obrint la vàlvula de tancament per complet, i la de reducció fins que el manòmetre de baixa indiqui la pressió adequada.

---

<sup>16</sup> Generador d'acetilè: són aparells per produir l'acetilè a partir de la reacció del carbur de calci amb l'aigua.



- Com a material d'aportació s'empren varetes metàl·liques de la mateixa composició que el metall que es desitja soldar.
- El desoxidant depèn de la naturalesa dels metalls que son soldats. És sol presentar en forma de pols que recobreix les varetes del material d'aportació.
- Canonades, en general de goma, que condueixen l'acetilè i l'oxigen fins al bufador, permetent a més que aquest es pugui moure amb facilitat. Solen ser de diferent color, la qual cosa permet diferenciar-les.
- Bufador. És el dispositiu en el qual es realitza la combustió de la barreja d'acetilè i oxigen, la composició del qual es regula adequadament per mitjà de dues vàlvules situades en l'empunyadura. També sol disposar de filtres intercanviables que permeten treballar amb peces de diferents grossors.
- Material de protecció adequat (ulleres protectores, roba, guants, etc.).
- Lloc de treball. Sol ser una taula composta per un tauler de material refractari i proveïda d'un suport per recolzar el bufador. També sol disposar d'un cargol de banc per subjectar peces petites, així com un recipient amb aigua per refredar les peces que es solden.

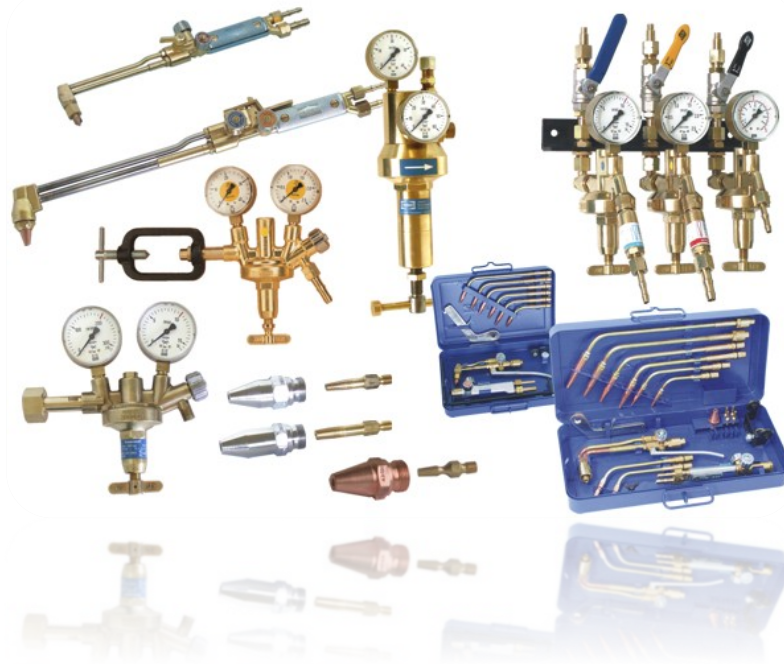


Figura 32. Equip principal soldadura autògena.

Font: <http://www.soldaweb.es>.



### 2.1.3. Metalls d'aportació

Són varetes de metall que s'utilitzen per a la realització del cordó de soldadura i la composició de la qual varia en funció de la naturalesa dels metalls a soldar. El metall de la vareta es fon i s'aporta a la unió per formar el cordó de soldadura. També es poden utilitzar aquestes varetes per realitzar recàrregues de material en determinades zones d'una peça.

Entre les característiques d'aquestes varetes cal examinar la forma i qualitat, doncs d'aquesta última depèn en gran part la qualitat del cordó. El metall d'aportació ha de reposar les pèrdues dels elements que a causa del procés s'hagin perdut.

La classificació dels metalls d'aportació en funció de la naturalesa del metall base és la més emprada, diferenciant els següents tipus:

- **Soldadura d'acers inoxidable.** S'utilitzen acers inoxidables d'igual composició que la del metall base aliats amb titani o wolframi que actuen com a estabilitzadors impedit l'oxidació.
- **Soldadura d'acers al carboni.** S'utilitzen varetes d'acers al magnesi o níquel amb càrregues de trencament superiors a les del metall base.
- **Soldadura d'acers especials.** S'utilitzen acers al crom vanadi o crom molibdè. Els cordons temperen en refredar-se a l'aire.
- **Soldadura del coure i els seus aliatges.** S'utilitzen varetes de coure aliats amb silici, plata o estany.
- **Soldadura de llautons i bronzes.** S'utilitzen llautons o bronzes de la mateixa composició que els metalls base.
- **Soldadura de l'alumini i els seus aliatges.** Pot utilitzar alumini similar al que es vol soldar o bé un aliatge d'alumini i silici, amb un 10% aproximadament d'aquest últim. Afegint silici a l'alumini s'obtenen cordons de més qualitat i es redueix el punt de fusió de la vareta d'aportació.

El metall de la junta ha de tenir la mateixa resistència que el metall base, per això s'utilitzen aliatges de composició similar a la dels metalls a soldar.

### 2.1.4. Fundents

Perquè la soldadura reuneixi les característiques adequades és necessari que es netegin perfectament les superfícies dels metalls a unir i s'eliminin els possibles òxids, grasses o qualsevol tipus de brutícia.

Els fundents s'afegeixen al cordó de soldadura durant el procés del mateix i formen una escòria de baixa densitat en reaccionar amb els òxids, evitant d'aquesta forma la contaminació del bany i la formació de nous òxids pel contacte amb l'oxigen de l'atmosfera.

La quantitat del fundent ha de ser adequada, doncs un excés empitjora l'acabat de la soldadura i augmenta el seu cost, per això, normalment s'utilitzen unes varetes de metall d'aportació revestides amb el fundent, assegurant així un dosatge exacte.

El fundent ha de ser fràgil per poder eliminar-ho fàcilment en finalitzar la soldadura perquè poden actuar com a agents corrosius fent malbé el cordó.

En funció dels metalls a soldar s'utilitzen diferents tipus de fundents, així com:

- Per a materials de ferro s'utilitzen fundents de bòrax<sup>17</sup>, bicarbonat sòdic, silicat sòdic, etc.
- Pel coure i els seus aliatges s'utilitza borats de sodi i potassi, carburs, clorurs i fosfats.
- Per a l'alumini, el magnesi i els seus aliatges, els fundents estan composts per clorurs i fluorurs alcalins. Aquests fundents han de tenir qualitats desoxidants molt marcades, a causa que l'òxid d'alumini és refractari<sup>18</sup>.

---

<sup>17</sup> Bòrax: és un compost important del bor. És un cristall blanc i suau que es dissol fàcilment en aigua.

<sup>18</sup> Refractari: es refereix a la propietat de certs materials de resistir altes temperatures sense descompondre's.

### **2.1.5. Mètodes de la soldadura oxiacetilènica**

Tenint en compte la posició de les peces i l'adreça del cordó de soldadura, podem considerar les següents tècniques de soldadura oxiacetilènica:

- Soldadura a l'esquerra.
- Soldadura a la dreta.
- Soldadura amb angle.

Algunes d'aquestes tècniques presenten diferents variants com es veurà més endavant. D'altra banda, existeixen uns altres dos mètodes considerats fora del grup principal de tècniques de soldadura.

- Soldadura en cornisa.
- Soldadura en sostre.

#### **Soldadura a l'esquerra**

Es diu també soldadura cap a endavant. El bufador es mou de dreta a esquerra, essent el mètode més utilitzat per soldar qualsevol metall o aliatge. Aquest mètode de soldadura té el gran inconvenient del seu cost elevat, per ser molt lent i per la quantitat de gasos que es consumeixen.

La vareta d'aportació va per davant del bufador que forma amb la superfície del material un angle entre 60° i 70°.

Pels metalls amb un punt de fusió baix, l'angle entre el bufador i la peça estarà entre 25° i 45°, i quan la penetració hagi de ser considerable, l'angle pot aconseguir els 90°. Aquest mètode està especialment indicat per a xapes de fins a 6mm d'espessor, i el diàmetre de la vareta d'aportació ha de ser igual a la meitat de l'espessor de la xapa més un mil·límetre.

Per a l'execució de la soldadura es dona al bufador un moviment d'oscil·lació lateral.

#### **Soldadura a l'esquerra semi ascendent**

Quan l'espessor de las planxes a soldar son superiors de 5mm, és emprat aquest mètode, que és una variant de l'anterior. La diferencia es que les planxes es disposen amb una inclinació de 20° a 45° respecte al plànol horitzontal.

Amb aquesta inclinació de les xapes es contraresta la tendència del material fos a lliscar sobre els mateixos o entre les vores a unir, amb el que s'aconsegueix millorar la qualitat de la soldadura.

### **Soldadura a la dreta**

En aquest mètode, la soldadura va progressant des de l'esquerra cap a la dreta i la flama es dirigeix cap a la part ja soldada, mantenint la vareta entre aquesta part i la flama.

Com la flama es dirigeix constantment sobre les vores a unir, per davant del bany de fusió, no és necessari imprimir al solapament cap tipus de balanceig lateral. D'altra banda la vareta, que va darrere de la flama, ha de rebre un moviment d'oscil·lació molt accentuat. El bany de fusió és menys fluït que en el mètode a esquerra, per la qual cosa els cordons solen resultar més irregulars i amb aigües més espaiades.

S'utilitza generalment per unir xapes d'un espessor entre 6 i 15 *mmi* requereix un previ aixamfranat en *V* de les vores amb un angle de 60º a 70º. No és aconsellable per soldar foneries o materials no ferrosos.

Respecte al mètode a l'esquerra, presenta els següents avantatges:

- Major velocitat d'execució.
- Menor consum de gasos.
- Millor penetració.
- Menor consum de metall d'aportació.
- Millor qualitat mecànica.

### **Soldadura en angle**

Aquesta tècnica de soldadura pot ser de dos tipus:

- Angle exterior.
- Angle interior.

En la soldadura en angle exterior s'empra el mètode a esquerra o bé semi ascendent, i es realitza sense metall d'aportació. No obstant, quan es vol reforçar les cantonades és necessari aportar una petita quantitat de vareta.

En la soldadura en angle interior, quan l'espessor de la peça és menor de 6 mm, s'aconsella el mètode a l'esquerra, però si l'espessor és major es recomana el mètode a la dreta.

El bufador ha de formar un angle de 45° respecte les peces a soldar i la vareta de 15° a 20° respecte la xapa vertical. Respecte la línia del cordó, el bufador s'inclinarà 45° i la vareta 30°.

En aquest tipus de soldadura existeix el perill d'escalfar excessivament la xapa vertical i produir mossegades sobre la mateixa. Per evitar-ho es dirigeix el metall d'aportació cap a la xapa vertical.

### **Soldadura en cornisa**

És aquella en la què es realitza un cordó horitzontal sobre dues xapes situades en posició vertical. És de difícil execució ja que el bany tendeix a despenjar-se.

Per a espessors d'1 a 4 mm convé utilitzar el mètode a l'esquerra, i per a majors el de la dreta. En general per a xapes de més de 8 mm, convé aixamfrantar les peces amb un angle de 70° distribuïts de la següent forma: 25° per a la vora inferior, 45° per a la vora de la xapa superior i deixant una separació entre peces de 2.5 mm.

La flama es dirigeix una mica cap amunt per contenir el metall fos i cal realitzar l'aportació aplicant la vareta cap a la vora superior. Sempre quan sigui possible, és aconsellable executar la soldadura amb dos bufadors, un per cada cara.

Per a la realització d'aquest tipus de soldadura es requereix una gran experiència per part de l'operari. Frequentment l'aspecte de qualitat no és totalment satisfactori, però es poden obtenir soldadures sanes amb bona penetració i aspecte acceptable.

### **Soldadura en sostre**

És de difícil execució a causa de la tendència del material fos a lliscar i caure pel seu propi pes. L'aspecte del cordó és molt irregular i la qualitat de la soldadura no resulta massa bona, per la qual cosa únicament s'utilitza aquesta tècnica si no existeix la possibilitat d'aplicar una altre.

L'execució d'aquestes soldadures en aquesta posició exigeix un gran entrenament de l'operari.

### 2.1.6. Aplicacions de la soldadura oxiacetilènica

El procés de soldadura per flama oxiacetilènica està pràcticament en total desús en la indústria, i per tant, també en la construcció naval. Com a procés de soldadura, la flama oxiacetilènica solament s'utilitza puntualment per a reparacions i petites produccions. L'objectiu és la reparació i recuperació econòmica de peces esquerdades o desgastades, com rodets i carcasses de bombes, turbines i compressors, culates, blocs, pistons, camises i vàlvules de motors, premses hidràuliques, tubs, xapes fines, etc.

Actualment, continua utilitzant-se pels processos de tall de xapa metàl·lica o oxitall. L'oxitall és una tècnica auxiliar a la soldadura, que s'utilitza per a la preparació de les vores de les peces a soldar quan són d'espessor considerable, i per realitzar el tall de xapes, barres d'acer al carboni de baix aliatge o altres elements ferrosos.

L'oxitall consta de dues etapes:

- En la primera, l'acer s'escalfa a alta temperatura (900 °C) amb la flama produïda per l'oxigen i el gas combustible.
- En la segona, un corrent d'oxigen talla el metall i elimina els òxids de ferro produïts.

En aquest procés l'equip és el mateix utilitzat en el procés de soldadura, canviant únicament el cabal de gas i el filtre del bufador.

En quant a l'aptitud del procés de la soldadura oxiacetilènica per ser aplicada a diferents materials, és molt bona. Es poden soldar-se tot tipus d'aliatges amb i sense ferro, amb l'excepció dels metalls refractaris i actius.



Figura 33 Exemples soldadura oxiacetilènica.  
Font: <http://commons.wikimedia.org>.

## 2.2. Soldadura per Arc Elèctric

### 2.2.1. Introducció i fonaments

Els procediments de soldadures més emprats industrialment són aquells on la font de calor té el seu origen en un arc elèctric.

La soldadura per arc elèctric es basa a sotmetre a dos conductors que estan en contacte a una diferència de potencial, per la qual cosa acaba establint-se un corrent elèctric entre tots dos. Si posteriorment se separen ambdues peces, es provoca una espurna que va a ionitzar<sup>19</sup> l'aire circumdant, permetent el pas de corrent a través de l'aire, encara que les peces no estiguin en contacte.

Els motius principals d'utilitzar l'establiment d'un arc elèctric són:

- Genera una concentració de calor en una zona molt delimitada.
- S'aconsegueixen temperatures molt elevades ( $> 5.000\text{ }^{\circ}\text{C}$ ).
- Es pot establir en atmosferes artificials.
- Permet la possibilitat d'establir-se en forma visible (arc descobert) o invisible (arc submergit o encobert).
- Permet la possibilitat d'establir-se de diverses formes, establint diferents mètodes de soldadura segons el cas (entre la peça i un elèctrode fusible, entre la peça i un elèctrode no fusible, entre dos elèctrodes fusibles o no fusibles, entre les pròpies peces a unir).

S'entén per arc elèctric, a l'artefacte que es produeix quan l'energia elèctrica es transforma en energia calorífica i en radiació electromagnètica en passar a través d'un conductor gasós.

En la soldadura per arc elèctric s'estableix un circuit entre la peça soldada i un elèctrode o un filferro. Quan un d'aquests dos elements es manté prop de la peça treballada, es genera un arc de temperatura extremadament elevada.

Perquè salti l'arc elèctric entre els dos pols del circuit, és necessari que ho faci a través d'un gas conductor de l'electricitat.

---

<sup>19</sup> Ionització: és el procés físic en el qual un àtom es converteix en un ió a l'afegir-li o treure-li electrons. Aquest procés és diferent, depenent de si es produeix un ió positiu o negatiu. Un ió positiu es produeix quan un electró d'un àtom absorbeix l'energia suficient per escapar de la barrera d'energia potencial que el confina. A l'energia que necessita un electró per escapar se l'anomena energia de ionització. Un ió negatiu es produeix quan un electró lliure xoca amb un àtom i és capturat per aquest, alliberant una certa quantitat d'energia.

Això s'aconsegueix ionitzant el gas mitjançant una descàrrega d'alta freqüència o encebant l'elèctrode en el procediment de soldadura manual. L'operació consisteix a raspar la punta de l'elèctrode (càtode) contra el metall (ànode) fent saltar electrons, que en tancar el circuit elèctric desplacen als electrons de les últimes capes dels àtoms del gas, quedant aquests ionitzats (carregats positivament) i fent a aquest gas conductor.

La calor que emet l'arc és suficient per fondre les vores de la peça treballada i la punta del filferro o l'elèctrode. Es tracta, per tant, d'una tècnica de soldadura per fusió.

Hi ha diversos mètodes de soldadura per arc elèctric adequats per a la construcció naval. Tots obliguen a protegir, de l'atmosfera, la zona de soldadura i poden classificar-se en mètodes de protecció amb gas, mètodes de protecció amb fundent i mètodes de protecció amb fundent i gas.

D'acord amb els informes elaborats pels fabricants d'equips de soldadura i dels corresponents materials fungibles i no fungibles, l'arc amb elèctrode consumible és el mètode de soldadura més comú. En l'actualitat, la soldadura elèctrica resulta indispensable per a un gran nombre d'indústries, per ser un sistema de reduït cost, de fàcil i ràpida utilització, resultats perfectes i aplicable a tota classe de metalls. El procés pot ser molt variat.



Figura 34. Exemples de fabricants d'equips de soldadura.

Font: <http://www.directindustry.es>.

### 2.2.2. Arc elèctric

L'arc elèctric té forma cònica amb vèrtex en la punta de l'elèctrode i base en la peça. Es distingeixen dues parts de l'arc:

- El plasma.
- La flama.



El plasma està compost per:

- Electrons que realitzen el transport del corrent i que van del pol negatiu al pol positiu. En xocar contra el pol negatiu els electrons transformen l'energia cinètica en energia calorífica.
- Ions metàl·lics que van del pol positiu al negatiu.
- Àtoms gasosos que es van ionitzant en perdre electrons i estabilitzant-se en guanyar-los en la recombinació produint en aquests processos gran quantitat de calor i emetent radiació.
- Productes de la fusió dels metalls com a vapors, fums, escòries, etc.

La flama és la zona que envolta al plasma i té una temperatura menor. Està formada per àtoms que es dissocien i recombinen desprenent calor i per la combustió del revestiment dels elèctrodes.

La força de major poder calorífic en l'arc és la que es produeix pel xoc dels electrons en l'ànode. Tot i que aquests tenen poca massa els xocs són molt nombrosos i a molta velocitat, la qual cosa fa que s'escalfi molt més el pol positiu que el negatiu.

Aquesta característica s'utilitza en soldadura amb corrent continu connectant el pol positiu a la peça quan necessitem major penetració, com en el cas de la unió en angle sense preparació de vores. Quan es preveu que el cordó pot desfonar-se, es connecta l'elèctrode al pol positiu com en el cas del cordó d'arrel de soldadures en unions a topall, preparació en V i entreferro en la pràctica de la construcció naval.

En aquest aspecte cal identificar les principals característiques de l'arc. Es tracta del gran desprendiment de calor que serveix per fondre instantàniament els metalls tant de les peces com de l'elèctrode d'aportació. Tenen un punt de fusió bastant més baix i permet realitzar soldadures en peces des d'un mil·límetre fins a grans espessors.

Una altra característica encara més important, és l'emissió de radiacions com a efectes no desitjats de l'arc que obliguen a prendre mesures de seguretat en el cos i la vista del operari per evitar els següents danys:

- Els rajos lluminosos produeixen enlluernament i irradiacions en els ulls.
- Els rajos infrarojos produeixen cremades en la pell.
- Els rajos ultraviolats s'acumulen en l'organisme i cremen la pell i els ulls.

Les radiacions són producte de les forces electromagnètiques derivades de la ionització i posterior recombinació que es produeix en excitar àtoms estables. Aquestes radiacions configuren un espectre que va des de la llum visible, els infrarojos, els ultraviolats, rajos X i gamma. Es programen amb caràcter ondulatori i a una velocitat constant de 300.000 *Km/seg*. Al conjunt d'aquestes ones es denomina espectre electromagnètic.

En tots els processos d'arc, tant l'elèctrode com les parts afectades per la calor i les parts foses han d'estar protegides perquè no reaccionin amb l'aire de l'ambient. Es diferencien per tant tres tipus de proteccions per dur a terme la soldadura amb arc elèctric:

- Protegits per escòria.
  - **SMAW**. Soldadura manual amb elèctrodes revestits.
  - **SAW**. Soldadura per arc submergit.
- Protegits per gas.
  - **TIG**. Soldadura per arc de tungstè amb protecció gasosa.
  - **GMAW (MIG, MAG)**. Soldadura per arc amb gas protector i elèctrode consumible, també coneguda com soldadura semiautomàtica.
- Protegits per escòria i gas (tot i que el gas pot o no aparèixer).
  - **FCAW**. Soldadura per arc amb nucli fundent.



Figura 35. Exemple soldadura per arc elèctric.

Font: <http://ecom.training.dupont.com>.

## 2.3. Soldadura SMAW

### 2.3.1. Introducció i fonaments

La soldadura manual amb arc elèctric és un sistema que utilitza una font de calor i un mitjà gasós generat per la combustió del revestiment de l'elèctrode, és a dir, que és un procés en el qual la fusió del metall es produeix per la calor generada en un arc elèctric establert entre l'extrem d'un elèctrode revestit i el metall base de les peces a soldar.

Amb la calor produïda per l'arc es crema el revestiment i es fon l'elèctrode, produint-se una atmosfera adequada perquè tingui lloc la transferència de les gotes de metall fos des de l'ànima de l'elèctrode fins al bany de fusió.

Aquestes gotes es projecten recobertes d'escòria procedent del revestiment que, per la seva tensió superficial, viscositat i densitat, flota i solidifica en la superfície formant una capa que protegeix el bany fos. D'aquesta forma, a mesura que es consumeix l'elèctrode es va dipositant material d'aportació alhora que l'arc es desplaça sobre la peça.



Figura 36. Soldadura SMAW.

Font: <http://www.nanosteelco.com>.

La corrent empleada pot ser contínua o alterna depenent de l'elèctrode emprat, però la font ha de ser capaç de controlar el nivell de corrent dins d'un interval per respondre a les variables del procés. És una soldadura discontinua ja que és necessari reposar l'elèctrode en la pinça porta elèctrodes cada vegada que es consumeix l'anterior i així successivament.

La soldadura manual es duu a terme en totes les posicions i per a tots els perfils:

- A topall.
- En angle i a solapament.
- En horitzontal.
- En vertical.
- En cornisa i en sostre.

En la taula següent s'indica el corrent més adequat en funció d'una sèrie de paràmetres.

Paràmetres	Corrent continua	Corrent alterna
<b>Soldadura a gran distància de la font</b>	-----	Preferible
<b>Soldadura amb elèctrodes de diàmetre petit i baixa intensitat</b>	Més fàcil	Arc d'encès difícil, la qual cosa pot provocar deterioració del material
<b>Encebat de l'arc</b>	Més fàcil	Més difícil si el elèctrode es de diàmetre petit
<b>Manteniment de l'arc</b>	Més fàcil, es molt estable	Més difícil si no s'emprenen elèctrodes de rendiment elevat
<b>Bufada magnètica</b>	Pot ser un problema amb material ferromagnètic	Sense problemes
<b>Posició de la soldadura</b>	Soldadura en vertical i baix sostre (intensitat baixes)	En totes posicions
<b>Tipus de l'elèctrode</b>	Qualsevol	Els que permetin restablir l'arc
<b>Espessor de la peça</b>	Preferible amb espessors petits	Útil amb espessors elevats per millorà el rendiment de la soldadura

Figura 37. Soldadura SMAW.

### 2.3.2. Equip de funcionament

L'equip necessari per a la soldadura SMAW és un equip senzill. De forma esquemàtica, sol estar format per:

- Font d'alimentació.
- Porta elèctrodes.
- Connexió de massa.
- Cables de soldadura.



Figura 38. Equip procés de soldadura SMAW.

Font: <http://www.machsources.com>.

### 2.3.3. Els elèctrodes i la seva classificació

La font d'energia emprada en aquest procés ha de ser d'intensitat constant, màquines de corrent constant o característica descendent perquè el corrent de soldadura es vegi poc afectada per les variacions de la longitud de l'arc. Per a una selecció de la font d'alimentació adequada (corrent continu o corrent altern), s'ha de tenir en compte l'elèctrode que s'utilitza, així com l'interval d'intensitats i la tensió en buit.

Els elèctrodes bàsics, a excepció d'alguns específics, requereixen corrent contínua mentre que pels altres tipus d'elèctrodes es pot emprar indistintament corrent contínua o alterna.

El porta elèctrodes té la missió de subjectar l'elèctrode i conduir l'electricitat fins a ell. A més ha de reunir les següents característiques:

- Ha de ser lleuger, per evitar la fatiga del soldador.
- Ha de tenir bona resistència a l'escalfament, permetent la refrigeració.
- Totes les superfícies han d'estar perfectament aïllades.
- L'elèctrode s'ha de poder col·locar i extreure fàcilment.
- Ha de permetre el moviment de balanceig necessari per a la realització del cordó.

La connexió de massa és un factor important a tenir en compte, doncs una col·locació incorrecta pot provocar el denominat bufo magnètic. Aquest és originat pel camp magnètic que s'estableix al voltant de l'arc i que indueix corrents en la peça a soldar, dificultant el control de l'arc. També és important una correcta subjecció del cable per evitar escalfament de la connexió i la desaparició de l'arc.

L'elèctrode és l'element fonamental en el procés SMAW i té quatre funcions bàsiques:

- Establir l'arc elèctric entre el metall base i ell mateix.
- Dirigir i controlar l'arc elèctric.
- Protegir el cordó de soldadura.
- Proporcionar el material d'aportació.

Es poden distingir dues parts en l'elèctrode revestit, tal com es pot veure en la figura següent:

- Vareta, ànima o nucli de l'elèctrode.
- Revestiment.



Figura 39. Elèctrode del procés SMAW.  
Font: <http://products.eworldtradefair.com>.

El nucli de l'elèctrode consisteix en una vareta metàl·lica que condueix el corrent elèctric i estableix l'arc elèctric. La calor produïda per aquest arc fa que es fongui progressivament la punta de la vareta en forma de petites gotes que es dipositen en el cordó de soldadura, proporcionant així el material d'aportació. El diàmetre de l'elèctrode es mesura en el nucli i determina el corrent de soldadura que s'ha d'utilitzar.

Pel que fa a la longitud de la vareta la més usual és la de 356 mm, encara que també existeixen elèctrodes de 457 mm i de 299 mm. El metall del que està constituït aquest nucli depèn del metall base que es vol soldar.

Si es solda acer, generalment els elèctrodes seran d'acer; i si es solda alumini, el nucli serà d'alumini, per tant el material base serà el mateix que el d'aportació.

El revestiment de l'elèctrode és la part fonamental de l'elèctrode, s'aplica per extrusió en calent i compleix les següents funcions:

- Facilitar l'encebament de l'arc.
- Estabilitzar l'arc.
- Generar una pantalla de gasos de protecció que eviti la contaminació del cordó per l'oxigen, el nitrogen i el hidrogen presents en l'atmosfera que ho envolta.
- Proporcionar elements que desoxiden, desfosforen i dessulfuren el metall fos.
- Reduir el nombre de porus i inclusions en la soldadura i eliminar gran part de les impureses.
- Formar una escòria que eviti el refredament brusc del cordó.

La composició d'aquests revestiments és molt complexa, ja que es tracta generalment d'una barreja de substàncies orgàniques i minerals. Poden ser de:

- Òxids naturals: òxids de ferro, sílice, ilmenita, etc.
- Silicats naturals: caolí, talc, mica, etc.
- Fundents: espat, fluor, etc.
- Productes orgànics: cel·lulosa, serradura, etc.
- Productes químics: carbonats, etc.
- Aliatges de ferro: de manganès, de silici, etc.
- Aglomerants: silicat sòdic, silicat potàssic, etc.

La classificació dels diferents tipus d'elèctrodes es fa en funció del revestiment. En aquest cas dependrà de l'espessor del revestiment i de la seva composició química:

### Segons l'espessor del revestiment

- **Elèctrodes prims:** són aquells on l'espessor del revestiment és menor al 10% del diàmetre de l'ànima. La protecció del metall fos és baixa.
- **Elèctrodes mitjans:** són aquells en els quals l'espessor del revestiment està comprès entre el 10 i el 40% del diàmetre de l'ànima. Obtenen una major estabilitat de l'arc, i, a més, formen una escòria que recobreix el metall solidificat, reduint l'oxidació i la velocitat de refredament. Permeten la soldadura amb corrent altern.

- **Elèctrodes gruixuts:** són aquells en els quals l'espessor del revestiment és superior al 40% del diàmetre de l'ànima. Són els que permeten obtenir les millors qualitats del metall soldat.

### Segons la composició del revestiment

- **Elèctrodes àcids (A):** són elèctrodes de revestiment mitjà-gruix composts per òxids de ferro, manganès i desoxidants. Produeixen una gran quantitat d'escòria de naturalesa àcida.
- **Elèctrodes bàsics (B):** aquests elèctrodes són de revestiment gruixut compostos principalment per carbonat i fluorur de calci que li donen una naturalesa metal·lúrgica bàsica. Produeixen poca escòria.
- **Elèctrodes cel·lulòsics (C):** el seu principal component és la cel·lulosa, que en contacte amb la calor generada per l'arc es descompon generant un gas que protegeix la soldadura. Aquests elèctrodes aconseguixen una alta velocitat de fusió i gran penetració. Generen poca quantitat d'escòria que, a més, es retira amb facilitat.
- **Elèctrodes de rútil (R):** el component principal és el rútil (òxid de titani) encara que alguns també porten cel·lulosa. Es classifiquen en:
  - **Elèctrodes volàtils:** amb un 25% de cel·lulosa en la seva composició, en cremar-se produeixen gasos que protegeixen el cordó de soldadura. Produeixen poca escòria.
  - **Elèctrodes no volàtils:** no contenen cel·lulosa en la seva composició. No produeixen gasos i encara que el cordó presenta millor aspecte, s'aconsegueix menor penetració i inferiors propietats mecàniques que amb els volàtils.
  - **Elèctrodes de baix hidrogen:** s'empren en la soldadura d'acers amb alt contingut en carboni i sofre per evitar l'absorció d'hidrogen atmosfèric.

També podem classificar-los **segons la forma d'aportació:**

- **Elèctrodes de gota freda:** donen lloc a un arc elèctric suau, amb poder de penetració mitjà. Se solen utilitzar amb corrent continu i polaritat directa, encara que també es poden utilitzar amb corrent altern.
- **Elèctrodes de gota calenta:** donen lloc a un arc dur, amb gran poder de penetració. Se solen utilitzar amb corrent continu i polaritat inversa o amb corrent altern.



- **Elèctrodes de gran revestiment:** són elèctrodes amb revestiment de rútil i un alt percentatge de pols de ferro, la qual cosa dóna lloc a un augment en la quantitat de metall dipositada i una major intensitat del corrent.

Un aspecte també important es la nomenclatura establerta per l'American Welding Society per tal d'identificar els diferents tipus d'elèctrodes. Aquests solen anar marcats amb un sistema d'etiquetat del tipus **E- UXYZ** on:

**E** és una lletra estàndard i fixe que va amb tots els elèctrodes.

**U:** primer dígit de la resistència a la tensió en milers de Psi.

**X:** segon dígit de la resistència a la tensió en milers de Psi.

**Y:** Posició de soldadura.

**Z:** Tipus de revestiment i corrent amb bord de connexió a la font de soldadura.

Per exemple, un elèctrode E - 7024 indica:

- Resistència a tensió de 70.000 Psi.
- Posició de soldadura: Filet pla i horitzontal.
- Tipus de revestiment: Rutil amb sodi.
- Tipus de corrent: alterna o contínua (connectada al terminal negatiu).



Figura 40. Nomenclatura AWS de l'elèctrode.

Font: <http://products.eworldtradefair.com>.

### 2.3.4. Posicions de soldadura per arc amb elèctrode revestit

Abans de realitzar la soldadura ha d'examinar-se el procés de fabricació de les peces buscant sempre la posició idònia de la soldadura. Tenint en compte la posició de les peces i l'adreça del cordó de soldadura, podem considerar les següents tècniques de soldadura per arc amb elèctrode revestit:

- Soldadura en horitzontal.
- Soldadura en cornisa.
- Soldadura en vertical.
- Soldadura en sostre.

#### **Soldadura en horitzontal**

Sempre que sigui possible es realitzarà en horitzontal per aconseguir major velocitat d'avançament, major penetració i rendibilitat, a part d'afavorir el treball del soldador.

Dins d'aquesta tècnica destaquen diferents variants:

- Soldadura a topall.
- Soldadura a solapament.
- Soldadura en angle.

La soldadura a topall es una de les més utilitzades en la soldadura de planxes de metall en la indústria naval.



Figura 41. Exemple soldadura horitzontal SMAW.

Font: <http://en.wikipedia.org>.

La soldadura a solapament es un dels altres tipus d'unions més comuns en la soldadura, tant en fabricació com reparació. Presenta l'avantatge de que el propi cordó augmenta la resistència dels panells metàl·lics units, per aquest motiu s'ha estès el seu ús en la indústria naval i en la fabricació de dipòsits.

La soldadura en angle és molt important fixar les peces a soldar, ja sigui en angle interior o exterior, per aconseguir un bon resultat. Prèviament s'estudiarà el cordó de soldadura (si s'utilitzaran varies passades o una sola), en funció de l'espessor de les planxes i de les sol·licitacions a les que estigui sotmes.

### **Soldadura en cornisa**

En aquest cas la soldadura es realitza sobre un pla vertical, i per tant, l'arc que és utilitzat ha de ser més curt i amb una intensitat menor per reduir el possible desbordament del toll<sup>20</sup>.

L'elèctrode es deu mantenir amb un angle d'inclinació lateral d'uns 10° i un angle d'inclinació longitudinal entre 15° i 25°.

Per dipositar el cordó es convenient donar un lleuger moviment de balanceig a l'elèctrode en zig-zag de dalt a baix o amb petits moviments semicirculars de retrocés. D'aquesta manera s'aconsegueix una distribució del calor més homogènia.

### **Soldadura en vertical**

Aquesta tècnica requereix un control de bany de fusió perquè no caigui per efecte de gravetat i s'utilitzen elèctrodes de gota freda. La soldadura pot realitzar-se des de dalt a baix, ascendent o pel contrari descendent.

La soldadura en vertical descendent es molt adequada per la soldadura de peces d'espessors mitjans o petits ( $< 6mm$ ). Per espessors superiors és recomanable la soldadura en vertical ascendent pel seu major poder de penetració.

L'elèctrode es deu mantenir en tot dos casos amb un angle d'inclinació longitudinal pròxim als 15°.

---

<sup>20</sup> Toll: En aquest cas fa referència al clot artificial on es dipositen les gotes de metall.



Figura 42. Exemple soldadura SMAW.  
Font: <http://www.thefabricator.com>.

### **Soldadura en sostre**

Es sense dubte la posició en que la soldadura resulta més complicada, degut a que el bany de fusió tendeix a caure per l'acció de la gravetat i a la posició que deu adoptar el soldador. A més, s'ha de cuidar especialment la protecció personal pel risc de cremades que poden produir les projeccions.

Per cebat l'arc, l'elèctrode es col·loca perpendicularment a la superfície a soldar i posteriorment s'inclina fins un angle longitudinal de uns  $10 - 15^\circ$  cap a davant, en el sentit d'avançament.

#### **2.3.5. Avantatges**

Els avantatges d'aquest mètode son els següents:

- L'equip de soldadura és relativament senzill, no gaire car i portàtil.
- El metall d'aportació i el mitjà de protecció procedeixen de l'elèctrode revestit.
- És menys sensible al vent i als corrents d'aire que els processos amb protecció gasosa.
- Es pot emprar en qualsevol posició tant en locals oberts com a tancats.
- Aplicable a la majoria de processos i aliatges.
- Aplicable a gran varietat d'espessors majors de 2 mm.

### 2.3.6. Inconvenients

Els avantatges d'aquest mètode són els següents:

- És un procés lent, a causa de la baixa taxa de deposició i a la necessitat de retirar l'escòria.
- Requereix gran habilitat del soldador.
- La taxa de deposició és baixa, a causa que l'elèctrode només pot consumir-se fins a una longitud mínima (uns 5 cm).
- No resulta productiu per a espessors majors de 28 mm.
- No és aplicable a metalls de baix punt de fusió, a causa que la intensa calor de l'arc és excessiu per a ells.

### 2.3.7. Aplicacions soldadura SMAW

La soldadura per arc amb elèctrode revestit és un dels processos que més s'utilitza. Els sectors de major aplicació són la construcció naval, construcció de màquines, estructures d'emmagatzematge, ponts, recipients a pressió i calderes, refineries de petroli, oleoductes, gasoductes i en qualsevol altre tipus de treball similar.

Es pot emprar a més, en combinació amb altres processos de soldadura utilitzant l'elèctrode revestit per a les passades d'arrel o les de farciment i la tècnica facilita el seu ús en totes les posicions de soldadura. S'aplica a gairebé tots els tipus d'acers: al carboni, inoxidable, acers aliats, resistents a la calor i a un gran nombre de metalls com alumini, coure, níquel i els seus aliatges.

La soldadura manual pot ser utilitzada tant en llocs tancats com en exteriors, es pot aplicar en qualsevol localització que pugui ser aconseguida per un elèctrode, fins i tot amb restriccions d'espai que no permeten la utilització d'altres equips. Aquesta és una de les avantatges més destacades enfront les altres tècniques de soldadura. A més la tècnica s'utilitza per la seva versatilitat en una àmplia gamma d'aplicacions en taller com en obra en la soldadura de materials d'espessor superior a 1,5 mm.

Els elèctrodes es seleccionen per reduir els costos de soldadura, tant en construcció naval com en tallers de caldereria pesada. Els elèctrodes bàsics de gran rendiment amb elevades característiques mecàniques, són utilitzats en construcció off-shore, on s'exigeixen alts valors d'impacte a baixa temperatura.

Per a l'usuari, és molt important disposar d'una correcta relació d'elèctrodes amb finalitats específiques. En aquest sentit, els catàlegs que editen els fabricants solen contenir una completa informació sobre diàmetres, paràmetres d'ús, revestiment, precaucions sobre el magatzematge i funcionament de cadascun dels seus productes.



Figura 43. Exemple aplicació soldadura SMAW.

Font: <http://en.wikipedia.org>.

## 2.4. Soldadura SAW

### 2.4.1. Introducció i fonaments

El procés de soldadura per arc submergit o mètode SAW (Submerged Arc Welding), és un procediment en el qual l'arc s'estableix entre un elèctrode continu i la peça a soldar sota la protecció d'una pols granulada denominada flux.

La soldadura per arc submergit és una variant de la soldadura per arc elèctric amb protecció de material fundent comú en moltes drassanes. La tècnica consisteix a dipositar una capa de material fundent granulat sobre la peça de treball per a continuació soldar amb un elèctrode consumible de filferro metàl·lic sense revestir. En general, l'elèctrode actua com a material de farciment, encara que en alguns casos s'afegeixen grànuls metàl·lics al fundent.



Figura 44. Exemple soldadura SMAW.  
Font: <http://www.kjellberg.de/es.html>.

El fundent cobreix l'arc, es liqua i protegeix i aïlla la zona soldada. L'elevada concentració de calor permet dipositar grans quantitats de soldadura amb bastant rapidesa. Després de la soldadura, el material fos queda protegit per una capa de fundent, que pot retirar-se i recuperar-se.

La soldadura per arc submergit només pot aplicar-se per sota del nivell de les mans i és idònia per soldar planxes a topall en línies de construcció de panells i zones de curvatura amb corròns i de construcció d'estructures. Aquesta tècnica s'aplica gairebé sempre amb equips totalment automàtics muntats en un carro mòbil o en una plataforma autopropulsada que es desplaça sobre la peça de treball. En ser el funcionament automàtic, bona part del temps s'utilitza en alinear la junta de soldadura amb la màquina.

D'igual manera, com l'arc SAW actua sota una capa de material fundent granulat, la taxa d'emissió de fums (FGR) o de formació de fums (FFR) és baixa i constant sota diverses condicions operatives, sempre que la capa de fundent sigui suficient.

En la soldadura per arc submergit l'elèctrode s'alimenta cap a la peça de forma contínua i amb velocitat controlada, en funció del tipus de material a soldar, espessor de la peça i intensitat de corrent, per mantenir constant la longitud de l'arc. En tot moment s'està aportant flux en la quantitat i a la velocitat necessàries a la soldadura, de manera que la calor produïda per l'arc fon progressivament part d'aquest flux. Com a resultat, es forma un mantell fundent que sura sobre el bany de soldadura, proporcionant així major protecció al cordó.

Durant tot el procés l'arc està cobert pel fundent. Les funcions del fundent son:

- Proporcionar protecció, evitant que els gasos atmosfèrics contaminin el bany de soldadura.
- Estabilitzar l'arc.
- Controlar les propietats mecàniques del dipòsit de soldadura.
- Permetre afegir elements d'aliatge.

Una vegada que s'ha realitzat la soldadura, es recull el flux sobrant i es recicla per a un nou ús.

Per obtenir bones unions soldades és fonamental una correcta regulació dels paràmetres de soldadura, aquests factors (figura 17) han de ser perfectament conegut per ajustar correctament la maquinària i obtenir així la millor qualitat possible.

La intensitat de corrent de la soldadura és el paràmetre de major influència ja que determina la taxa de deposició i influeix en la forma i penetració del cordó. Un augment de la intensitat, sense variar altres paràmetres, dóna lloc a:

- Augment de la penetració.
- Augment de la densitat de corrent.
- Augment de la velocitat d'alimentació del fil.
- Augment de la taxa de deposició.



La soldadura per arc submergit es pot aplicar en tres maneres, però tenint en compte que en tots ells és necessari col·locar la peça de manera que el bany de soldadura romangui en el seu lloc fins a la seva solidificació:

- Soldadura semiautomàtica
- Soldadura automàtica
- Soldadura mecanitzada

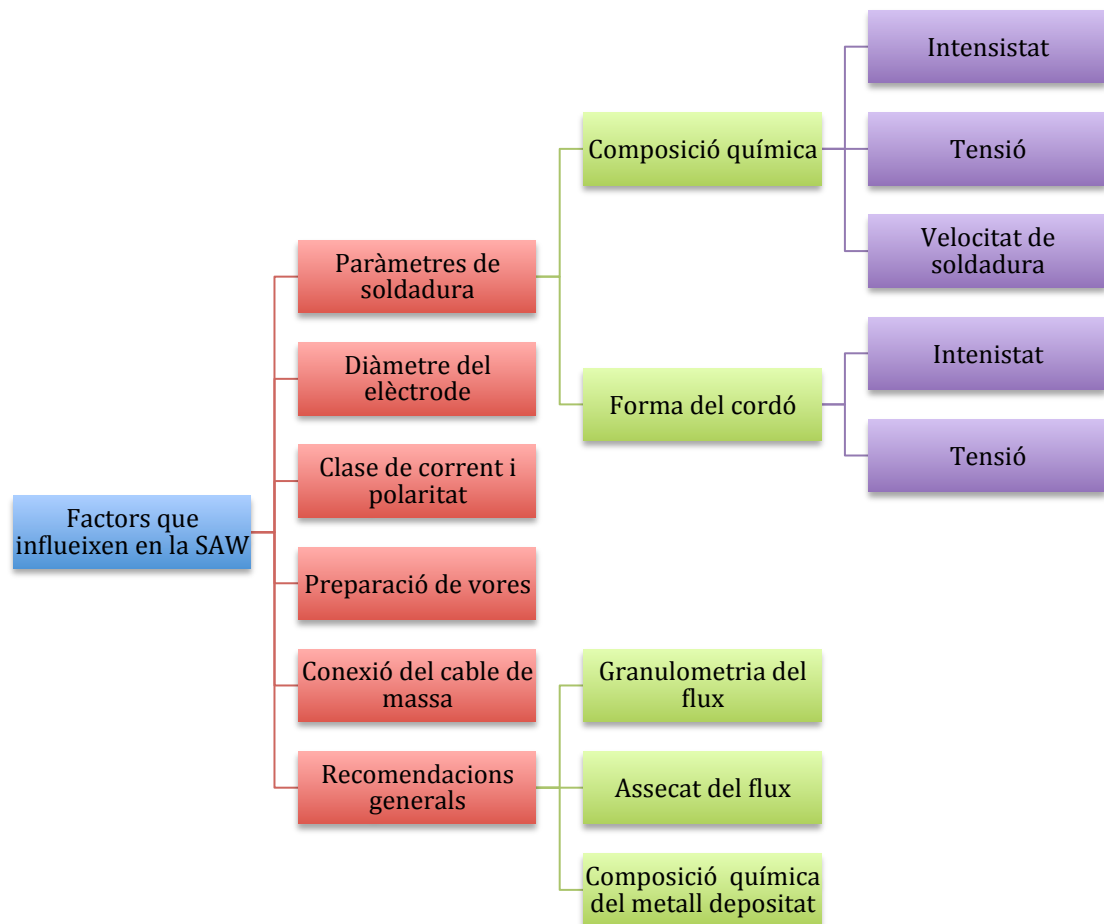


Figura 45. Paràmetres de soldadura SAW.

La soldadura **semiautomàtica** es realitza amb una pistola soldadora de mà que subministra tant l'elèctrode com el fundent. L'elèctrode es subministra través d'un alimentador mentre que el fundent es pot subministrar mitjançant una tremuja<sup>21</sup> de gravetat muntada en la pistola o a través d'una mànega a pressió.

<sup>21</sup> Tremuja: dipòsit en forma de tronc de piràmide o de tronc de con invertits. Funciona com un embut, en el qual hom acumula i emmagatzema diverses matèries que hi son posades per la seva part superior i surten per la part inferior alimentant una màquina, o carregant un camió o vagó.

Aquest mètode requereix maneig manual emprant velocitats d'avanç moderades i elèctrodes de petit diàmetre. És una tècnica que es troba en desús a causa de la incomoditat que suposa el maneig manual de la pistola.

La soldadura **automàtica** la realitza un equip sense que un operador hagi de controlar i ajustar contínuament els paràmetres.

La soldadura **mecanitzada** es realitza amb un equip, però sota la contínua vigilància d'un operador encarregat de col·locar la peça a soldar en la posició adequada i regular els paràmetres de la soldadura, a més d'iniciar i aturar el procés.

#### 2.4.2. Equip de funcionament

L'equip de soldadura SAW està format pels següents dispositius:

- Font d'alimentació.
- Sistema i panell de control.
- Capçal.
- Equip accessori.

#### 2.4.3. Elèctrodes i flux

Com en la majoria de processos de soldadura per arc, els elèctrodes són els principals elements consumibles, on destaquem els elèctrodes i el flux.

Els elèctrodes se subministren en forma de fil massís o tubular i amb flux o pols metàl·lica allotjada en el seu interior, en rodets de 10 a 500 Kg de pes. També es poden trobar elèctrodes en forma especials per a dipòsits determinats que se subministren en bobines.



Figura 46. Elèctrodes i flux per la soldadura SAW.

Font: <http://www.lulusoso.com>.

El diàmetre del fil depèn del interval en el qual es trobi la intensitat de soldadura.

Els elèctrodes es classifiquen segons la seva composició química, existint elèctrodes per a la soldadura d'acers al carboni, acers de baix aliatge, acers aliats, acers inoxidable i altres aliatges. Aquests fils d'acer es troben recoberts de coure amb un triple objectiu:

- Evitar la corrosió.
- Augmentar la conductivitat elèctrica
- Reduir el fregament amb els corrons del sistema d'alimentació.

Els fluxos són barreges de compostos minerals entre els quals es troben:  $SiO_2$ ,  $TiO_2$ ,  $CaO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $MnO$ ,  $MgO$ ,  $Na_2O$ ,  $FeO$ ,  $K_2O$ ,  $Li_2O$ ,  $CaF_2$ ,  $ZrO_2$ . Tenen un aspecte pulverulent format per grans i la seva grandària depèn del tipus de soldadura. Les principals funcions del flux són:

- Protegir la zona de l'arc del contacte amb l'atmosfera que ho envolta.
- Proporcionar desoxidants i elements d'aliatge al cordó.
- Crear una capa d'escòria que protegeixi al bany de fusió i al cordó durant el refredament.

Atenent al procés de fabricació, els fluxos es classifiquen en:

- Fosos.
- Cohesionats o sinteritzats.
- Aglomerats.
- Barrejats mecànicament.

### **Fosos**

Els fluxos fosos es fabriquen fonent en un forn elèctric, a una temperatura entre 1500°C i 1700 °C, la matèria primera prèviament triturada, calcinada i barrejada en sec. La barreja obtinguda després de la fusió es cola, es refreda ràpidament, es tritura i classifica segons la seva granulometria.

Els avantatges d'aquest tipus de flux són:

- Composició química homogènia.
- No presenten caràcter higroscòpic.
- Són adequats per a altes velocitats de soldadura.
- Permeten el reciclat.

Les seves limitacions són:

- Aporten una petita quantitat de desoxidants i aliatges de ferro.
- Tenen una limitació d'intensitat de corrent d'uns 800 A.

### **Cohesionats o sinteritzats**

Els fluxos cohesionats o sinteritzats es fabriquen cohesionant les matèries primeres polvoritzades i barrejades en sec amb silicat sòdic, silicat potàssic o una barreja de tots dos. Després d'aquest cohesionat la barreja humida és sinteritzada i cuita a una temperatura relativament baixa.

Els avantatges d'aquest tipus de flux són:

- Aporten major quantitat d'elements desoxidants i elements aliats al bany de fusió.
- En tenir poca densitat permeten una capa de flux més gruixuda.
- L'escòria és fàcil d'eliminar.

Les seves limitacions són:

- Tenen caràcter higroscòpic<sup>22</sup> el que pot donar lloc a l'aparició de porus en el cordó.
- Possibilitat de canvi en la composició del flux, a causa de la pèrdua de partícules fines.

### **Aglomerats**

Els fluxos aglomerats tenen el procés de fabricació similar al dels cohesionats, amb la diferència que en aquest cas s'utilitza un aglomerant ceràmic, amb un assecat a temperatures relativament elevades.

Els avantatges d'aquests fluxos són:

- Aporten major quantitat d'elements al bany que els cohesionats.
- El consum de flux és menor.
- Es poden utilitzar amb fils no aliats.

---

<sup>22</sup> Higroscòpic: capacitat d'algunes substàncies d'absorbir o cedir humitat al medi ambient. Són higroscòpics tots els compostos que atreuen aigua en forma de vapor o de líquid del seu ambient, per això sovint són utilitzats com a dessecants.

## Barrejats mecànicament

Fluxos barrejats mecànicament es fabriquen barrejant diferents tipus de fluxos en les proporcions necessàries per aconseguir les propietats desitjades. Són molt poc utilitzats perquè:

- Presenten segregacions durant l'envasament, emmagatzematge o manipulació.
- Poden tenir inconsistència del flux.



Figura 47. Braços mecànics per soldadura SAW.

Font: <http://www.pressreleasefrom.com>.

### 2.4.4. Avantatges

Els avantatges que presenta aquest mètode de soldadura per arc submergit son:

- L'arc actua sota una capa de flux, evitant les projeccions i augmentant la seva estabilitat.
- En ser un procés automàtic, permet ajustar perfectament els paràmetres de soldadura.
- El procés es pot utilitzar amb altes velocitats de soldadura i elevades taxes de deposició.
- El flux actua com a desoxidant, agent netejador i si es desitja, pot aportar elements d'aliatge.
- Es pot utilitzar en zones exposades al vent.
- S'obtenen cordons amb baixos continguts en hidrogen (element important en el procés que dóna lloc a esquerdes).
- S'obtenen soldadures de bona qualitat.

### 2.4.5. Inconvenients

Aquest tipus de soldadura presenta unes determinades limitacions:

- És necessari un dispositiu per a l'emmagatzematge, alimentació i recollida del flux.
- És necessari extreure i eliminar l'escòria
- El flux està exposat a possibles contaminacions, que poden produir discontinuïtats en la soldadura.
- El procés no és adequat per unir materials d'espessors menors de 5 mm.
- Excepte en aplicacions especials, només pot aplicar-se a les posicions sobretaula i cornisa.
- Generalment es requereix l'ús d'anells de respatller.

Les perspectives es basen en aprofitar l'elevada quantitat de calor posada en joc en el procés SAW, evitant al mateix temps que aquest excés deteriori les característiques mecàniques dels materials base.

En aquesta línia, l'addició de pols metàl·lica, ja sigui adherit magnèticament al fil d'aportació o alimentat per davant de l'arc elèctric presenta els següents avantatges:

- Incrementa notablement la taxa de deposició.
- Optimitza el rendiment tèrmic del procés.
- Evita un indesitjable augment del gra en el metall base.
- Millora la tenacitat de la unió soldada.

### 2.4.6. Aplicacions soldadura SAW

La soldadura per arc submergit s'utilitzava fonamentalment per a la soldadura d'acers suaus de baix aliatge. A mesura que s'han anat desenvolupant nous fundents, la seva ocupació s'ha estès també a la soldadura del coure i aliatges d'alumini i titani. Són soldadures normalment automatitzades, destinades principalment a soldadures d'unions llargues i rectes, en horitzontal i per a espessors superiors a 5mm.

L'equip va muntat sobre un carro autopropulsat o pot desplaçar-se per un pont. En alguns treballs, com en la soldadura de recipients cilíndrics, el capçal de la màquina de soldadura és fix i es fa girar la peça. Existeixen també equips manuals destinats a treballs d'unions de menor longitud i amb recorregut no rectilini.

És un procés molt utilitzat en edificació, fabricació de canonades, estructures i components ferroviaris, construcció de dipòsits a pressió i en la indústria naval. La soldadura per arc submergit està àmpliament estesa en la soldadura a topall en les construccions navals, en la fabricació de recipients a pressió, tubs i estructures metàl·liques.

Una de les aplicacions fonamentals per aquest procediment és la fabricació de canonada soldada en espiral usades pel transport de productes petrolífers (oleoductes) o de gas natural (gasoductes).



Figura 48. Aplicacions soldadura SAW.

Font: <http://www.mmsonline.com>.

Una millora sensible en la productivitat aconseguida en el procés SAW la constitueix la soldadura tàndem ambdós elèctrodes que treballen en un mateix bany. Al primer d'ells se li encomana la penetració i el volum del cordó i al segon, la seva geometria i grandària.

## 2.5. Soldadura TIG

### 2.5.1. Introducció i fonaments

Un altre tipus de soldadura amb protecció gasosa és la soldadura per arc de tungstè també coneguda com soldadura amb gas inert i tungstè (TIG) o pel seu nom comercial Heliarco. Això és degut a que l'heli va ser el primer gas protector utilitzat. Es va tractar del primer dels “nous” mètodes de soldadura presentat uns 25 anys després de la soldadura per elèctrode. L'arc es genera entre la peça de treball i un elèctrode de tungstè que no es consumeix. El gas inert, en general argó o heli, proporciona l'atmosfera protectora i garanteix un treball net i amb poques emanacions.



Figura 49. Soldadura TIG.

Font: <http://www.messer-eutectic.co.za>.

Aquesta tècnica emprava per al gas una pressió igual o major a l'atmosfèrica utilitzant com a font d'energia l'arc elèctric que salta entre un elèctrode no consumible i la peça a soldar, mentre un gas inert protegeix el bany de fusió. D'aquesta forma es crea una barrera protectora que impedeix la contaminació del metall fos amb l'oxigen i nitrogen atmosfèric.

El procés es realitza en condicions d'atmosfera inerta, a 6000 K. Aquest gas adquireix propietats elèctriques en passar a l'estat plasmàtic a determinades condicions d'intensitat i voltatge de corrent elèctric. El gas argó empleat és de puresa elevada amb contingut de contaminants menors a 500 ppm.

Perquè el rendiment del procés sigui òptim ha de mantenir-se un caudal suficient del gas de protecció i una intensitat de corrent adequada al treball que es té que realitzar.



A més s'ha d'evitar que les superfícies de les vores d'unió tinguin brutícia. Sota aquestes condicions l'arc és estable i es produeix gairebé sense sorolls.

La forma d'operar és similar a la soldadura oxiacetilènica com s'ha esmentat anteriorment. La seva aplicació manual exigeix una gran habilitat per part del soldador, a més l'energia de l'arc es pot regular igual que la flama, amb l'avantatge que l'arc no introdueix productes de la combustió que poguessin contaminar el bany. Encara que es tracta d'un procés essencialment manual, s'ha automatitzat per a algunes fabricacions en sèrie, com canonades de petit espessor soldades longitudinal o helicoïdalment i per la fixació de tubs a plaques en intercanvis de calor.

El Tungstè és un metall de color gris, d'alt punt de fusió (entre 3400 i 4000 °C). S'obté una millora important en les seves propietats quan a aquests elèctrodes se'ls addiciona òxid de Tori (Th), Zirconi (Zr), Lantani (La) o Ceri (Ce) en quantitats entre el 0.15 – 4.2%. Els elèctrodes emprats per a aquesta tècnica es classifiquen segons la Norma ISO 6848.



Figura 50. Tungstè. Equip soldadura TIG.

Font: <http://www.tesolgroup.com>.

Pot ser emprat en tot tipus d'unions o posicions i en els materials més diversos: acers al carboni, inoxidable, metalls sense ferro, etc. El material d'aportació, quan és necessari, s'aplica a través de varetes com en la soldadura oxiacetilènica.

### 2.5.2. Equip de funcionament

L'equip necessari per realitzar la soldadura consta de:

- Màquina per a la soldadura.
- Ampolla de gas protector amb el seu corresponent manoreductor i un cabalímetre de gas.

- Cable per al subministrament de corrent a l'elèctrode.
- Cable i pinça de massa.
- Pistola per a la soldadura.

Donat que la soldadura TIG és un procés que no produeix escòries i que es realitza en una atmosfera inerta que no provoca reaccions en el bany, el material d'aportació quan s'utilitzi, haurà de tenir bàsicament una composició química similar a la del material base que es presenta en forma de varetes de diferents diàmetres.

Els gasos de protecció utilitzats i les seves tècniques més adequades es divideixen en els següents tipus:

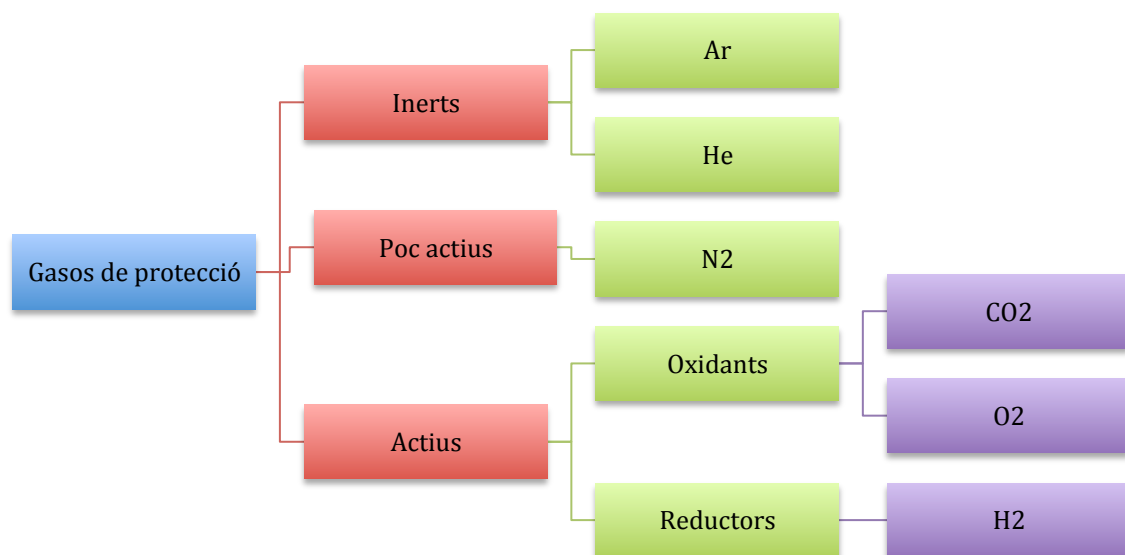


Figura 51. Gasos de protecció.

L'argó i l'heli son gasos monoatòmics, incolor, insípid i pertanyen al grup dels gasos inerts o nobles.

L'argó es troba present en l'atmosfera en proporcions relativament apreciables, de l'ordre del 0,94% en volum. S'obté industrialment a partir de la destil·lació fraccionada de l'aire líquid. El seu ús es troba molt estès en la soldadura, siderúrgia, metal·lúrgia, forns de metal·lització, en la producció d'atmosfera inerts i com a generador de gas plasma. No sol ser utilitzat individualment en la soldadura semiautomàtica dels acers per oferir un bany molt poc fluid amb una forta tendència a la formació de porus.

L'heli es troba present en l'atmosfera en la proporció del 0,0015% en volum. En alguns jaciments de gas natural es troba en quantitats apreciables, de fins a un 10%. El seu ús resulta econòmic en EE.UU on el gas acompanya al cru en els pous de petroli.

En Europa l'heli és escàs i resulta car, per la qual cosa ha estat desplaçat per l'argó. No obstant això s'aplica en soldadura, atmosferes inertes en metal·lúrgia i barrejat amb oxigen, en respiració subaquàtica i soldadura en càmeres hiperbàriques<sup>23</sup>.

Resulten tècnica i econòmicament interessants quan es necessari incrementar l'energia aportada. Això ocorre quan es solden materials d'alta conductivitat tèrmica, com alguns dels citats en el següent quadre. Aquesta propietat comporta una elevada dissipació de calor durant la soldadura a través de la massa de metall base.

Material	Posició de soldadura	Espessor (< 5 mm)	Espessor (≥ 5 mm)
<b>Alumini i aliatges</b>	Totes	Argó	75% He - 25% Ar
<b>Coure i aliatges</b>	Totes	Argó 75% He - 25% Ar	Heli 75% He - 25% Ar
<b>Níquel i aliatges</b>	Totes	Argó	75% He - 25% Ar

Figura 52. Taula materials d'alta conductivitat tèrmica.

### 2.5.3. Elèctrodes soldadura TIG

Els elèctrodes no consumibles tenen com a missió principal mantenir l'arc sense aportar material al bany de fusió. En cas necessari s'afegeixen petites quantitats de zirconi<sup>24</sup> per aconseguir-ho. Per aquest motiu i per evitar el seu desgast, és molt important que posseeixi una alta temperatura de fusió. És la raó per la qual, quan s'empra corrent continu, l'elèctrode se sol connectar al pol negatiu, doncs la calor generada en l'extrem és inferior i roman més fred que si es connectés al pol positiu.

<sup>23</sup> Càmera hiperbàrica: és un habitacle amb tancament hermètic, dissenyat per suportar en el seu interior l'augment controlat de pressió i descompressió.

<sup>24</sup> Zirconi: és un metall dur i resistent a la corrosió semblant a l'acer.

Els diferents tipus d'elèctrodes per a la soldadura TIG es classifiquen en funció de la seva composició, sent els elèctrodes de tungstè pur els més utilitzats.

Es distingeixen els següents tipus:

- Elèctrode de tungstè pur.
- Elèctrode de tungstè tori<sup>25</sup>.
- Elèctrode de tungstè zirconi.

El tori i el zirconi són bons emissors d'electrons. L'increment en l'emissió d'electrons disminueix la temperatura de treball de l'elèctrode i augmenta la seva capacitat per conduir el corrent elèctric, la qual cosa incorpora avantatges importants en la realització de la soldadura.

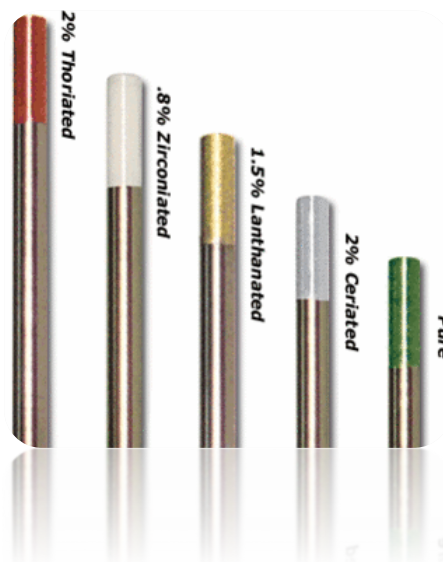


Figura 53. Tipus d'elèctrodes de tungstè.

Font: <http://www.weldmyworld.com>.

Com es veu en la figura, els elèctrodes de tungstè s'identifiquen per un codi de colors estandarditzat. En l'extrem de cada elèctrode es marca la barra amb el color apropiat. Aquesta marca es fa de tal forma que no augmenti el diàmetre perquè podria interferir amb els contactes mecànics durant la seva utilització.

L'AWS ha establert un sistema d'identificació estàndard per aquest tipus d'elèctrodes. La lletra E significa elèctrode. La W és el símbol atòmic del tungstè. L'última lletra/es es refereixen a l'aliatge o òxid que s'ha afegit al tungstè. La P denota tungstè pur sense elements d'aliatge.

---

<sup>25</sup> Tori: és un metall lleugerament radioactiu, que es troba a l'escorça terrestre, i està considerat com una possible alternativa a l'urani com a combustible nuclear.

La resta de designacions que es poden utilitzar inclouen: Th per tori, Zr per zirconi, Ce per Ceri, La per lantani i G pels aliatges que no s'hagin normalitzat. En alguns aliatges s'utilitza un guió seguit del nombres 1 o 2 per indicar els percentatges aproximats de l'aliatge o òxid.

Classificació AWS	Composició del tungstè	Color de la punta
<b>EWP</b>	Pur	Verd
<b>EWTh-1</b>	1% de tori afegit	Groc
<b>EWTh-2</b>	2% de tori afegit	Vermell
<b>EWZr</b>	De 0,25% a 0,5% de zirconi afegit	Vermell/Marró
<b>EWCe-2</b>	2% de ceri afegit	Taronja
<b>EWLa-1</b>	1% de lantani afegit	Negre
<b>EWG</b>	Aliatge no especificat	

Figura 54. Classificació per l'AWS del elèctrodes de tungstè.

### Tungstè pur

Els elèctrodes de tungstè o wolframi pur (EWP) tenen una temperatura de fusió aproximadament de 3400°C. Quan es solden durant un temps suficient, el tungstè es fon formant una gota de metall fos en la punta de l'elèctrode i per això exigeix que la punta tingui forma arrodonida. S'utilitzen fonamentalment amb corrent altern per la soldadura de l'alumini i els seus aliatges.

### Tungstè tori

Els elèctrodes de tungstè tori (EWT) tenen major punt de fusió, aproximadament de 4000°C, i no formen gota de metall fos.

La proporció de tori que s'utilitza és baixa, un 1 o un 2%. Aquests elèctrodes aguanten millor la possible contaminació per contacte amb el bany però s'ha d'evitar sempre.

L'alta temperatura de fusió d'aquests elèctrodes ha permès que pugui donar-se a l'elèctrode una terminació en punta. Ha de ser afilada, per això, és necessari utilitzar una esmeriladora destinada únicament a aquest ús.

S'utilitzen amb corrent continu per a la soldadura d'acers al carboni, acers inoxidable, coure, etc. El preu d'aquests elèctrodes resulta de l'ordre d'un 10 a un 15% superior als de tungstè pur.

### **Tungstè zirconi**

Els elèctrodes de tungstè zirconi tenen major punt de fusió (aproximadament de 3800°C), i igual que els elèctrodes de tungstè tori, són més cars que els EWP i poden ser més prims. La quantitat de zirconi en l'elèctrode està compresa entre el 0,3 i el 0,9%.

Aquests elèctrodes poden ser utilitzats tant en corrent continu com en altern i per aquest motiu es coneixen també com a elèctrodes multi ús. Depenent del tipus de corrent que s'utilitzi es triarà un elèctrode amb punta arrodonida corrent altern o punxegut corrent continu.

#### **2.5.4. Posicions de soldadura TIG**

La soldadura pot realitzar-se en qualsevol de las següents posicions:

- A topall.
- A solapament.
- En angle interior o exterior.
- En vertical.
- En cornisa.
- En sostre.

En la soldadura a topall la pistola ha de tenir una inclinació entre 75 i 85° amb la peça. Al començament de la soldadura s'ha d'escalfar prèviament la xapa donant un moviment circular a l'elèctrode fins que es produeixi el bany de fusió.

Una vegada format el bany es desplaça l'elèctrode de forma rectilínia per la junta sense moviment de balanceig. D'aquesta manera s'obté un cordó continu i uniforme.

En els casos de la soldadura a solapament i en angle per facilitar l'operació, el bany de fusió sol iniciar-se en la peça inferior, proper a la junta. Quan s'obté el bany s'aproxima l'elèctrode i llavors s'adreça cap a la junta, traslladant d'aquesta forma el bany per fusió. Quan s'aporti material, és necessari que es faci sempre en una zona on el metall base estigui perfectament fos i sempre en la quantitat justa perquè el cordó sigui uniforme.

La soldadura en vertical pot realitzar-se tant en posició vertical descendent com ascendent. L'ús d'una o altra tècnica depèn principalment de l'espessor de les xapes. Per a espessors petits s'utilitza la tècnica de soldadura vertical descendent pel seu menor poder de penetració i per a espessors gruixuts la tècnica de soldadura vertical ascendent.

En la soldadura en cornisa gairebé sempre és necessari l'aportació de material perquè el cordó presenti un aspecte uniforme. La posició de l'elèctrode i de la vareta és d'uns 15 o 20° d'inclinació respecte la perpendicular a la superfície de les xapes i lleugerament inclinats cap avall. El dipòsit de metall ha de realitzar-se el més proper possible a la vora superior per evitar el descolgament i millorar l'aspecte del cordó. Per això sempre s'ha de treballar amb la longitud de l'arc més petita possible.

També la soldadura en sostre presenta com a principal problema el descolgament del cordó. Per evitar-ho es treballa amb intensitats més reduïdes que en les altres posicions. En aportar metall a la junta s'ha de retirar lleugerament l'arc perquè solidifiqui ràpidament.

L'elèctrode ha d'avançar amb un angle respecte a la perpendicular a la superfície d'uns 15 o 20°, mentre que la vareta ha de ser col·locada amb la mateixa inclinació respecte a la superfície de les xapes.

### **2.5.5. Avantatges**

En la soldadura TIG es poden destacar els següents avantatges respecte a altres mètodes de soldadura:

- Aquest mètode no sempre precisa de material d'aportació, com en el cas de les xapes fines.

- No es produeixen fums ni esquitxades, amb la qual cosa s'estalvien costos en protecció de l'operari, sistema de ventilació i treball final al no haver de netejar la superfície després de la soldadura.
- No es produeixen inclusions d'escòries ni es precisa la seva eliminació després de la soldadura.
- A causa que es realitza sota una atmosfera inerta s'aconsegueixen soldadures més resistents a la corrosió, netes de contaminacions, més dúctils i fortes.
- És possible realitzar soldadures en totes les posicions.
- Es pot aplicar per a una àmplia gamma de metalls.
- S'aconsegueixen cordons de gran qualitat i elevat rendiment.

#### **2.5.6. Inconvenients**

Les limitacions generals que presenta la soldadura TIG són:

- Requereix una destresa més exigent que la resta de tècniques de soldadura mencionades fins ara.
- La protecció gasosa pot ser remoguda per les corrents d'aire. Aquesta s'ha de mantenir contínua durant tot el procés.

#### **2.5.7. Aplicacions soldadura TIG**

El procés TIG s'aplica principalment als acers inoxidables, al crom resistents a la calor, alumini, níquel i els seus aliatges.

Degut que el procés posseeix les virtuts necessàries per aconseguir soldadures d'alta qualitat i amb una elevada puresa metal·lúrgica, exemptes de defectes i bon acabat superficial és ideal per a soldadures de responsabilitat en la indústria del petroli, química, petroquímica, d'alimentació, de generació d'energia, nuclear, etc.

S'utilitza en la soldadura de metalls sensibles a l'oxidació i es pot soldar a topall i sense aportació de material des de 0,3 a 4mm. Presenta les limitacions de tot procés amb protecció gasosa.





Figura 55. Aplicacions soldadura TIG.  
Font: <http://blogs.circletrack.com>.

## 2.6. Soldadura GMAW

### 2.6.1. Introducció i fonaments

La soldadura per arc amb gas protector i elèctrode consumible es coneix també com soldadura semiautomàtica. Va ser desenvolupada per soldar metalls d'espessor més grans que un quart de polzada (0,64 cm), fent ús d'un gas inert o actiu per a la seva protecció de l'atmosfera. D'aquí deriven les inicials **MIG**, de l'anglès Metall Inert Gas i **MAG** Metall Activ Gas.

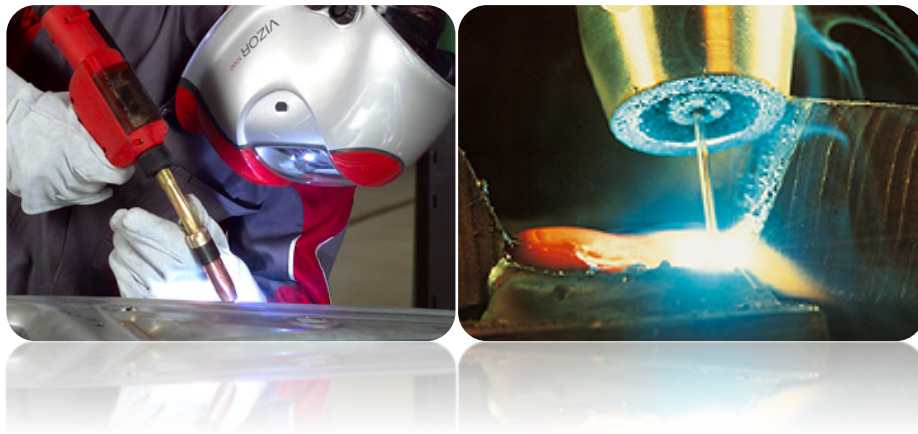


Figura 56. Tècnica de soldadura MIG/MAG.

Font: <http://www.fronius.com>.

Aquest tipus de soldadura consisteix a mantenir un arc d'elèctrode consumible de fil sòlid i la peça que es va a soldar. L'arc i el bany de soldadura estan protegits mitjançant un gas inert o actiu depenent si el gas de protecció reacciona o no amb l'arc.

L'elèctrode metàl·lic es alimentat contínuament per una pistola de soldadura mentre que es fon durant el procés de soldadura. Tot seguit passa a formar part del cordó (metall d'aportació) i es protegeix de la zona de soldadura amb un gas o mescles de gasos inerts. Quan el gas o barreja de gasos que protegeixen el cordó són gasos actius, com el diòxid de carboni, argó més diòxid de carboni o argó més oxigen, aquesta tècnica de soldadura rep el nom de soldadura MAG.

El procediment d'aquest mètode es basa en la fusió de les vores de les peces a unir i del fil d'alimentació que serà el metall d'aportació. La calor generada per l'arc elèctric que s'estableix entre el fil i la peça i per l'impacta dels electrons sobre el terminal positiu pot aconseguir temperatures properes als 4000°C.

El corrent que s'utilitza és corrent continu, aconseguint millors resultats quan es treballa amb polaritat inversa ja que satisfà millor en la penetració, velocitat de fusió i en la neteja d'aquells metalls que presenten òxids en la seva superfície. Per aquest motiu és més utilitzada que la polaritat directa.

### 2.6.2. Material d'aportació i gas de protecció

L'elèctrode que s'utilitza és un fil continu i nu, que pot dur un recobriment de coure per augmentar la seva conductivitat elèctrica. Aquest fil es troba enrotllat com una bobina i mitjançant uns corròns de pressió moguts per un motor elèctric es fa arribar al filtre de la pistola amb la velocitat requerida per la soldadura.

Els elèctrodes poden ser de dos tipus:

- Elèctrodes massissos.
- Elèctrodes tubulars.

#### Elèctrodes massissos

La composició química dels elèctrodes massissos ha de ser similar a la del metall base per igualar o superar les seves propietats mecàniques. En cas d'utilitzar  $CO_2$  com a gas de protecció, hauran de tenir un alt percentatge d'elements desoxidants i així evitar l'oxidació del bany. Estan recoberts a més, per una pel·lícula de coure per millorar la conductivitat elèctrica i contribuir a impedir la formació d'òxids superficials. Els diàmetres habituals són 0,6; 0,8; 1,0; 1,2 i 1,6 mm podent aconseguir, en soldadura de forta intensitat els 2,4 mm.

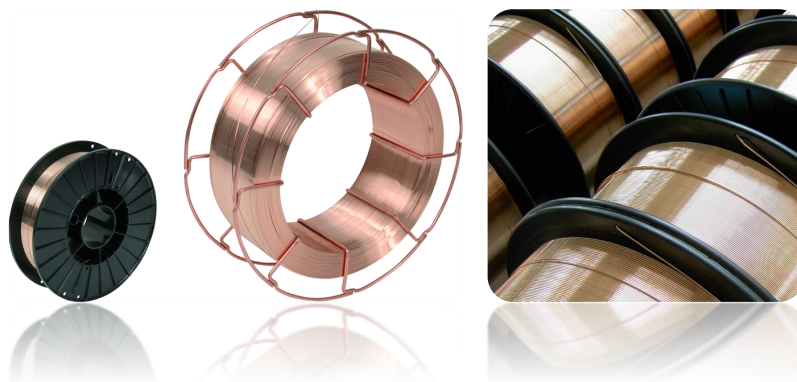


Figura 57. Elèctrode massís d'aliatge de coure i elèctrode tubular.

Font: <http://www.made-in-china.com>.

## Elèctrodes tubulars

Els elèctrodes tubulars estan constituïts per un tub metàl·lic farcit d'una mescla d'elements denominada flux. Aquest flux conté substàncies ionitzants per estabilitzar l'arc, desoxidants per evitar l'oxidació, elements d'aliatge que augmenten la resistència i tenacitat del metall dipositat. La soldadura amb fil tubular es caracteritza per utilitzar grans densitats de corrent, aconseguint una taxa de deposició major i permetent una major velocitat de soldadura que amb l'elèctrode massís. A més, s'aconsegueix també major penetració, permetent reduir la separació entre les peces a soldar.

## Gasos de protecció

La protecció del bany de fusió és en tots dos casos gasosa. En el procés MIG s'utilitzen gasos inerts que són molt estables i no reaccionen amb l'arc com l'argó, l'heli, el neó, el criptó, el radó i el xenó.

Els gasos inerts de protecció més utilitzats en el procés MIG són:

- **L'argó.** Té una densitat alta, la qual cosa proporciona una bona protecció; baixa energia de ionització, que facilita l'encebament de l'arc i ho estabilitza; i baixa conductivitat tèrmica, amb el que dona lloc a una mala penetració i cordons estrets.
- **L'heli.** Té molt baixa densitat i, per tant, protegeix l'arc amb major dificultat; alta energia de ionització, que implica un mal encebament de l'arc i poca estabilitat; i alta conductivitat tèrmica que dona lloc a una bona penetració i cordons amples.
- **La mescla argó i heli.** La seva proporció oscil·la entre un 30% a un 70%. Té l'avantatge de poder augmentar la velocitat de soldadura o la penetració, ja que té una millor aportació tèrmica de l'arc.

En canvi, en la soldadura MAG s'utilitza com a gas protector un gas actiu que intervé amb l'arc de forma més o menys decisiva com el diòxid de carboni, argó més diòxid de carboni, argó més oxigen, argó més hidrogen i argó més nitrogen.

Els gasos actius o mescles de gas actiu i gas inert de protecció més utilitzats pel procés MAG són:

- El **diòxid de carboni** ( $CO_2$ ), té densitat elevada, la qual cosa proporciona una bona protecció; alta energia de ionització, que implica un mal encebament de l'arc i poca estabilitat; i alta conductivitat tèrmica, que dóna lloc a una bona penetració i cordons amples.
- **L'argó i oxigen**, afegeixen petites proporcions d'oxigen al argó (1,2% o 5% d' $O_2$ ) millorant així la penetració, en eixamplar la part inferior del cordó.
- **L'argó i diòxid de carboni**, aquesta barreja s'utilitza quan es volen aconseguir millors resultats que amb el  $CO_2$ , doncs millora l'acabat superficial del cordó i redueix les projeccions.
- **L'argó, heli i  $CO_2$** , aquesta barreja permet aconseguir cordons de molt bon acabat, gairebé sense sobre espessor.
- **L'argó,  $CO_2$  i  $NO$** , on l'òxid de nitrogen reacciona amb l'ozó format en la soldadura millorant la protecció del bany. L'elecció del gas de protecció és funció del material a soldar, i està directament relacionat amb el tipus de transferència, penetració i forma del cordó.

### 2.6.3. Modalitats de transferència

A continuació es mostren les diferents modalitats de transferència:

- Transport per polarització o arc d'esprai.
- Transport per arc premut.
- Transport globular.
- Transport per curtcircuit.

El transport per **polarització o arc d'esprai** es caracteritza per la formació de gotes molt petites de material, que són transportades en la direcció de la vareta al bany de fusió a través del plasma de l'arc. Les gotes de metall són d'una grandària inferior o igual al diàmetre de l'elèctrode. Aquesta circulació de gotes de l'elèctrode al bany de fusió no interromp la circulació de corrent, de manera que l'arc és continu i roman estable en treballar amb intensitats altes mentre es va produint la polarització.

El **transport per arc premut** es pot considerar com una modificació del transport anterior. La font d'energia produeix una senyal de corrent que controla la freqüència dels impulsos, de manera que pot regular l'aportació de calor i de metall a la unió. El corrent de base és l'encarregat de mantenir l'arc durant el procés.

El corrent mitjà utilitzat és menor que amb l'arc esprai, per la qual cosa s'empra per soldar espessors menors i es redueixen les projeccions. En la soldadura d'alumini l'existència d'aquests impulsos afavoreix la destrucció de la capa d'òxid, ja que es produeixen temperatures superiors als 2000°C.

El **transport globular** utilitza intensitats amb valors suficients per fondre la vareta del metall, però inferiors a les intensitats emprades en el transport per polarització. Es produeixen gotes d'una grandària superior al diàmetre de l'elèctrode que es poden deformar podent provocar curtcircuits (arcs inestables). A més, la penetració aconseguida és baixa pel que únicament s'utilitza en la soldadura d'espessors petits.

El **transport per curtcircuit** es coneix com a transport d'arc curt i s'aconsegueix quan es treballa amb intensitats baixes i petits diàmetres de la vareta. El metall de la vareta comença a fondre's i forma una gota que va augmentant fins que entra en contacte amb el bany de fusió. En aquest moment circula el corrent de curtcircuit i s'extingeix l'arc. El corrent de curtcircuit produeix l'estricció del metall fent desprendre-ho de la vareta, permetent que torni a establir-se l'arc.

#### 2.6.4. Equip de funcionament

L'equip necessari per realitzar la soldadura MIG o MAG està compost bàsicament per:

- Font o generador d'alimentació de tensió de corrent constant.
- Unitat de control per a la regulació dels paràmetres de soldadura.
- Pistola pel subministrament de l'elèctrode.
- Alimentador del fil.
- Equip d'ampolla i cabalímetre per subministrar el cabal necessari de gas de protecció.



Figura 58. Equip soldadura MIG/MAG.

Font: <http://oxicom.cl>.

Figura 59. Ampolles de gas per la soldadura MIG/MAG.

Font: <http://www.solter.com>.

En quant a les ampolles dels gasos emprats en la soldadura, és interessant parlar de dos aspectes importants. El primer d'ells és l'etiqueta i és el primer i principal suport indicatiu del contingut d'una ampolla. L'etiqueta recull les informacions obligatòries en relació al gas de l'ampolla. Els textos i símbols de l'etiqueta s'elaboren d'acord amb la reglamentació vigent.





Figura 60. Etiqueta ampolla de gasos industrials.

Font: <http://www.es.airliquide.com>.

- 1- Denominació del gas.
- 2- Símbol de risc, classe i N° UN.
- 3- Frase de risc.
- 4- Frase de seguretat.
- 5- Fabricant del gas.
- 6- Aplicació del gas.

El segon aspecte és un mètode complementari d'informació que consisteix en la identificació pel color de l'ogiva. És útil en cas de no poder apropar-se a la ampolla. És un dels requisits del Reglament és l'adaptació a la Norma EN 1089-3 que defineix els colors europeus de les ampolles de gas.



Figura 61. Classificació pels colors de les ogives de les ampolles de gasos industrials.

Font: <http://www.es.airliquide.com>.



### 2.6.5. Posicions de soldadura

Les posicions de soldadura i la trajectòria descrita per la pistola tenen gran importància i encara que lògicament la posició més favorable és l'horitzontal, també poden realitzar-se:

- En horitzontal.
- En vertical.
- En cornisa.
- En angle.
- A topall.

La soldadura pot realitzar-se a dretes o a esquerres, sent aquest últim cas el recomanat per a espessors petits. Això és degut a la seva menor penetració ja que el fil ha de dirigir-se sempre al centre de la junta.

En la soldadura horitzontal la pistola es desplaça a l'esquerra o a la dreta amb un angle d'inclinació longitudinal de 60 a 70° i un angle d'inclinació lateral de 90°. Si la soldadura es realitza en angle la inclinació lateral serà de 45°.

La soldadura vertical pot ser ascendent o descendent. En general es recomana la soldadura vertical ascendent per aconseguir millors propietats mecàniques, encara que en el cas d'espessors fins, s'utilitza la descendent per la seva menor aportació calorífica.

Quan la soldadura es realitza en angle s'imprimeix a la pistola un moviment de zig-zag o de mitja lluna. En unions a topall el moviment es realitza amb els mateixos angles que en la posició horitzontal.

### 2.6.6. Avantatges

Els avantatges d'aquesta tècnica son els següents:

- L'elèctrode és continu. Poden realitzar cordons de gran longitud sense necessitat d'interrupcions, evitant el perill d'imperficcions i augmentant la productivitat.
- La taxa de deposició és elevada.
- És l'únic procés amb elèctrode consumible que pot soldar tots els metalls i aliatges comercials.
- Al no existir escòria, la neteja després de la soldadura és més fàcil.
- Pot ser utilitzat en totes les posicions.

### 2.6.7. Inconvenients

Les limitacions d'aquesta tècnica son:

- L'arc ha de ser protegit de corrents d'aire que podrien arrossegar el gas de protecció, la qual cosa limita la seva utilització a zones protegides.
- L'equip es més complex i costós que en el procés SMAW.
- Encara que la seva mobilitat és acceptable, resulta inferior que el procés SMAW.
- La gamma de materials d'aportació és limitada per les dificultats de trefilatge<sup>26</sup> d'alguns acers.
- Si no s'aplica correctament presenta una certa tendència a provocar faltes de fusió.
- El defecte de porositat és freqüent en aquest procés, sobretot si la tècnica d'aplicació no és correcta.

Seguidament s'exposen en forma de quadre les analogies i diferències entre les tècniques de soldadura MIG i MAG:

Criteri	MIG	MAG
<b>Gas d'aportació</b>	Normalment d'argó	CO <sub>2</sub> o mescles
<b>Generador</b>	De potencial constant o de característica descendent	De potencial constant
<b>Tipus de transport</b>	Arc esprai	Arc esprai o arc curt
<b>Metalls a soldar</b>	Acer inox., coure i alumini	Acers ordinaris
<b>Espessors a soldar</b>	Mitjans i gruixuts	Tots
<b>Posicions de soldadura</b>	Fàcils	Tots

<sup>26</sup> Trefilatge: procés de fabricació de filferro i varetes de metall. Es tracta d'un procés industrial que implica la reducció de la secció transversal i, en conseqüència, un augment en la longitud del material.

<b>Regulació</b>	Pocs sensibles	Exigeix precisió
<b>Visibilitat</b>	Bona	Regular
<b>Projeccions</b>	Rares	Abundants
<b>Neteja de vores</b>	Exigeix molta neteja	Admet peces oxidades
<b>Fums</b>	Poc molestos	Poden ser nocius

Figura 62. Taula soldadures MIG/MAG.

### 2.6.8. Aplicacions de la soldadura GMAW

Els processos de soldadura MIG i MAG compten amb un gran nombre d'aplicacions en la indústria per ser procediments que ofereixen la possibilitat de soldar pràcticament tots els metalls, en gairebé totes les posicions de soldadura i en un ampli interval d'espessors, oferint unes bones característiques de la unió soldada.

D'aquesta manera el seu ús ha anat creixent a causa de la seva demanda per les empreses, per la mínima quantitat de pèrdues materials i la seva major productivitat.

Al principi aquest tipus de soldadura es va aplicar als acers inoxidable i als aliatges de Mg i Al (sèries 3000, 5000 i 6000). Actualment ja s'aplica a acers al C i de baix aliatge, als aliatges de base de Ni per l'ús a altes temperatures i als coures i els seus aliatges (excepte els que continguin Zn).

Altres materials, com els acers d'elevada resistència, els aliatges d'Al de les sèries 2000 i 7000, fosa de ferro i aliatges de Ti i de metalls refractaris, entre uns altres, també poden soldar-se mitjançant GMAW. Però en aquests casos s'ha de recórrer a tractaments tèrmics pre i post soldadura, materials d'aportació especials, control exhaustiu del gas de protecció fins i tot requerint gas de respatller en la part posterior de la soldadura. La soldadura s'utilitza en un ampli interval d'espessors des de 0,5 mm fins a 13 mm.

Tenint en compte els diferents tipus de transferència amb els quals és possible utilitzar aquest procés, està considerat com el més versàtil en posicions de soldadura. Això es deu especialment al desenvolupament de la tècnica de soldadura per arc premut que necessita una aportació tèrmica menor donant lloc a banys fosos també més petits. Per tant, i entre altres aplicacions, aquest procés de soldadura s'empra:

- En la soldadura de peces de grans dimensions.
- En la soldadura de dipòsits a pressió.
- En la soldadura de components de l'automòbil.



Figura 63. Aplicacions soldadura GMAW.

Font: <http://www.ewm-sales.co.uk>.

## 2.7. Soldadura Làser

### 2.7.1. Introducció i fonaments

La soldadura làser és un procés de fusió localitzat per l'aportació d'energia mitjançant un feix de radiació làser, el qual provoca que la zona fosa es vagi solidificant, donant lloc al cordó de soldadura.

El làser és un acrònim de "Light Amplification by Stimulated of Radiation", que fa referència al seu procés de generació i que significa llum amplificada per estimulació de radiació.

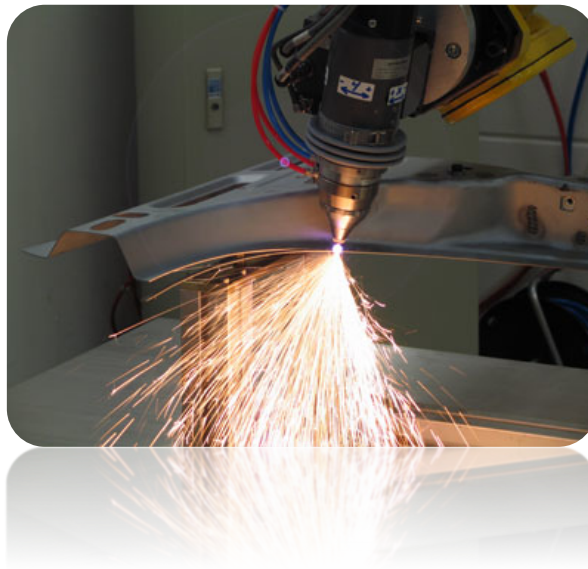


Figura 64. Soldadura làser.  
Font: <http://www.ailu.org.uk>.

Les característiques que distingeixen a la radiació làser d'una altra radiació lluminosa, és que la radiació làser s'emet amb una determinada longitud d'ona, amb una diferència de fase constant, amb una divergència pràcticament nul·la i es caracteritza per ser una radiació unidireccional.

La soldadura làser utilitza l'energia proporcionada per un feix de radiació làser per fondre els materials a unir, donant lloc a la unió dels mateixos. En aquest procés no és imprescindible material d'aportació i la soldadura té lloc per l'escalfament de la zona a soldar.

Per generar aquesta llum, el funcionament d'un làser combina tres principis d'òptica fonamentals:

- **Mitjà que subministra els àtoms (sòlid, líquid o gas):** és el procés pel qual els electrons dels àtoms passen a una capa electrònica de nivell i potencial energètic més alts. Augmenten els seus nivells d'energia.
- **Emissió estimulada de llum:** quan un element excitat torna a un nivell d'energia inferior, la diferència entre aquests dos nivells energètics es tradueix en l'emissió espontània d'un fotó. Aquest fotó en xocar contra una altra partícula excitada, provoca l'emissió estimulada per part d'aquesta partícula d'un nou fotó coherent amb el primer i en la mateixa direcció.
- **Ressonància òptica:** Seguint el procés anterior, es genera progressivament un nombre creixent de fotons fins a aconseguir un equilibri entre l'energia proporcionada i la dissipada. Una part d'aquesta radiació s'extreu i s'utilitza com a feix de treball.

Una vegada conformat el feix del làser, es focalitza mitjançant miralls o lents en una zona molt reduïda del material. En arribar a la temperatura de fusió té lloc la ionització de la barreja composta pel material vaporitzat i el gas protector. La capacitat d'absorció energètica del plasma és major que la del material fos donant lloc a una pressió i temperatura elevades. La pressió i temperatura altes continuen mentre es produeix el moviment del capçal arrossegant la columna de plasma que envolta al material fos al llarg de tot el cordó de la soldadura.

### 2.7.2. Tipus de làser

La classificació més usual dels diferents tipus de làser és la que es fa en funció del mitjà que subministra els àtoms o molècules com a suport per produir la llum amplificada. Existeixen segons el mitjà actiu:

- Làsers d'estat sòlid.
- Làsers d'estat gasós.
- Làsers d'estat líquid.

Entre els làsers d'estat sòlid destaquen el d'ió de crom en cristall de robí, o el de granat d'itri i alumini dopat amb ions de neodimi<sup>27</sup> o YAG, conegut com làser Nd-YAG ( $Y_3Al_5O_{12} + Nd^{3+}$ ). Aquests empenen un material cristal·lí com a mitjà actiu. Segons el tipus de ions presents en el cristall, els làsers es denominen de Nd-YAG, amb una longitud d'ona d'1.064 nm, o de Yb-YAG, amb una longitud d'ona d'1.030 nm.

Les principals tecnologies de làsers d'estat sòlid són:

- **Làsers de barra:** en aquest cas els cristalls tenen una geometria cilíndrica, de manera que el feix generat surt per la base dels cilindres. L'energia òptica necessària per excitar els ions presents en el cristall s'obté utilitzant llums de gas o díodes làser.
  - **Làsers de barra bombats per llums:** la font d'excitació del cristall són llums i se solen posicionar dos en cada càmera. Aquestes llums emeten una llum blanca que només és absorbida en part pel cristall.
  - **Làsers de barra bombats per díodes:** en aquest cas la font d'excitació del cristall són una sèrie de díodes que es col·loquen orientats cap al cristall. La seva utilització permet obtenir una major eficiència elèctrica global del làser que amb llums d'excitació.
- **Làsers de disc:** en aquest tipus de làsers, els cristalls tenen forma de disc i són de cristall Yb-YAG.
- **Làser de fibra:** es tracta de làsers en els quals s'empra una fibra òptica dopada i on s'utilitzen díodes per estimular els àtoms inserits. A més, el nucli de la fibra porta un recobriment de baix índex de refracció per servir de guia a la llum de bombament.

Entre els làsers d'estat gasós destaca el produït en una massa gasosa de  $CO_2$ ,  $N_2$  i  $He$ , conegut com a làser de  $CO_2$ . Altres làsers produïts en gasos inerts són els làsers  $He - Ne$ , amb potències reduïdes.

---

<sup>27</sup> Neodimi: és una terra rara que compon el metall de Misch aproximadament en un 18% sent una de les terres rares més reactiva. Posseeix una lluentor metàl·lica-plaquetat i brillant. Enfosqueix ràpidament al contacte amb l'aire formant un òxid. Pertany a la família dels elements de transició interna i conté en la seva forma estable 60 electrons i el seu isòtop més conegut és Nd-142. El metall de Misch és un aliatge d'elements de terres rares en diferents proporcions de forma natural.

També es produeixen làsers en mitjans gasosos no inerts, denominats làsers excímers<sup>28</sup>, en barreges de clorhídric i fluorhídric amb gasos inerts com l'argó, xenó i criptó. De tots ells el  $CO_2$  és el més utilitzat a nivell industrial al món de la construcció naval. Aquests làsers s'exciten amb un corrent elèctric.

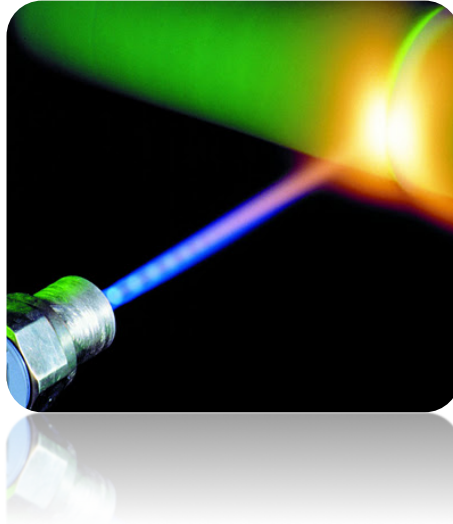


Figura 65. Exemple tipus de làser per la soldadura.

Font: <http://globalinkmfg.com>.

Per la generació del làser de  $CO_2$ , el feix de llum utilitza una barreja de gasos ( $CO_2$ ,  $N_2$ , He) i uns altres possibles additius. Les molècules de nitrogen transfereixen l'energia produïda per l'impacte dels electrons a les molècules de  $CO_2$ . Les molècules de  $CO_2$  excitades passen a un nivell d'energia inferior emetent un fotó, que formarà part del làser emès. La presència d'heli dins de la càmera permet a les molècules de  $CO_2$  tornar al seu estat no excitat, tornant així disponibles per a un nou cicle. Per a la realització d'aquests processos, és necessària una pressió molt baixa en la càmera del làser, generalment entre 100hPa i 250hPa i amb un longitud d'ona de 10,6 $\mu$ m.

A diferència del làser Nd-YAG, la generació d'aquests làsers es produeix de forma contínua, per la qual cosa s'aplica als processos en els quals es requereix de gran potència i d'una elevada velocitat. La radiació polsada s'utilitza més en treballs de precisió o quan no és necessari un rigorós control de l'escalfament de la peça.

---

<sup>28</sup> Làser excimer: el típic utilitza una combinació de gas inert com argó, criptó o xenó, amb un gas reactiu. En condicions apropiades d'estimulació elèctrica, una pseudo-molècula és creada, la qual existeix solament en un estat excitat i pot originar una llum làser en el rang ultraviolat.



### 2.7.3. Els gasos en la soldadura làser

Els gasos emprats en soldadura làser han de complir diverses funcions:

- Protegir al metall fos de l'atmosfera.
- Controlar la formació de plasma.
- Protegir les òptiques del fum i de les esquitxades.
- Controlar l'afinat de les propietats del material.

Aquestes funcions són les mateixes tant si es solda amb làser de  $CO_2$  com amb Nd-YAG, a excepció del control de la formació del plasma que solament es té en compte en el cas dels làsers de  $CO_2$ . És important triar bé el gas per a cada aplicació de soldadura, pel que cal tenir en compte:

- Tendència a la formació de plasma
- Afinitat de les propietats del material

Durant la soldadura làser d'alta potència la zona de la unió s'omple amb metall en estat vapor, àtoms ionitzats i electrons, formant un plasma que facilita la transferència d'energia entre el làser i el material. Aquest plasma pot absorbir molta energia del feix i impedir la soldadura. Els gasos de la soldadura i de l'ambient poden reduir o augmentar la formació del plasma.

En la taula es mostren les propietats dels diferents gasos:

Gas	Pes molecular (g/mol)	Conductivitat tèrmica a 1bar (W/m·K)	Energia de ionització (eV)	Densitat relativa/aire
He	4	0,15363	24,6	0,14
Ar	40	0,17320	15,8	1,38
$N_2$	28	0,02550	15,6	0,96
$CO_2$	44	0,01616	13,8	1,52

Figura 66. Taula dels gasos de la soldadura làser.

L'heli és un gas inert, però redueix la formació de plasma perquè té una energia de ionització elevada i un pes molecular petit. En canvi l'argó es ionitza amb facilitat essent propens a la formació excessiva de plasma que també és pròpia de la soldadura làser de  $CO_2$  d'alta potència ja que requereix una alta intensitat d'energia.

Per moltes aplicacions, és convenient utilitzar gasos inerts, com són l'heli i l'argó, perquè no reaccionen amb el metall soldat. En canvi, els gasos actius com són el diòxid de carboni i el nitrogen, poden reaccionar amb el metall base formant òxids, carburs i nitrurs, veient-se afectades les propietats mecàniques de les peces. No obstant això, aquests gasos poden ser avantatjosos en determinades aplicacions, com l'ús del nitrogen per proporcionar major resistència a la corrosió i una menor variació a la microestructura de la soldadura en centenars tipus d'acer inoxidable.

El làser d'estat líquid rep el nom de làser colorant, ja que el líquid conté una suspensió de tintures orgàniques com és la rodamina. S'exciten normalment amb un làser d'argó o llums flaix. No obstant en l'indústria, l'aplicació és pràcticament nul·la.

#### 2.7.4. Mètodes de soldadura

Es poden distingir dos processos de soldadura per làser en funció de la densitat de potència aplicada sobre la peça:

- **Per conducció o amb fusió:** S'utilitza densitat de potència baixa. En iniciar l'aplicació del raig làser el metall reflecteix gran quantitat de la radiació i solament absorbeix una petita part, que escalfa per conducció el metall a la zona d'incidència del feix i els seus voltants. Una vegada que la calor aportada és prou elevada es fon la superfície del metall. Aquest metall en estat líquid absorbeix major proporció d'energia del làser amb el que s'aconsegueix un major aprofitament de l'energia.
- **Per penetració:** En aquest procediment s'utilitzen làsers de densitat de potència alta ( $> 1010 \frac{W}{m^2}$ ) que proporcionen un major aprofitament de l'energia i una major penetració de la soldadura. Es tracta d'escalfar la zona de la soldadura per sobre del punt de fusió, formant un forat en el metall. Aquesta cavitat s'omple de metall vaporitzat que absorbeix gairebé el 100% de l'energia làser, i que es transfereix des de les parets del forat cap al metall, fonent-ho. El plasma que omple el forat exerceix una pressió que empeny el material fos en sentit contrari al de l'avançament del feix de làser.

### 2.7.5. Equip

Una instal·lació làser dedicada a la soldadura de materials metàl·lics consta de les parts següents:

- **Un generador làser:** és la màquina encarregada de transformar l'energia elèctrica de xarxa en llum coherent.
- **Un camí òptic:** encarregat en traslladar la llum làser des del generador fins al lloc d'aplicació. Per a això s'usen una sèrie de miralls que giren el raig. Alguns tipus de làser permeten realitzar la conducció de llum per fibra òptica, la qual cosa aporta una major flexibilitat als processos.
- **Una cabina de protecció:** la seva funció és protegir a les persones que es troben en aquesta zona i evitar l'entrada de forma descontrolada. Les seves característiques depenen del tipus d'aplicacions i de la tecnologia emprada en el generador làser. Integren en el seu interior els següents elements:
  - **Un capçal d'aplicació:** és l'encarregat de recollir el làser al final del camí òptic i adequar-ho, mitjançant òptiques, perquè les seves característiques siguin les adients en el lloc d'aplicació. Se li poden afegir elements suplementaris com a càmeres, sensors, elements de subjecció, conduccions de fil de soldar, etc. depenent de l'aplicació.
  - **Un sistema de moviment:** per poder efectuar la unió entre dues peces és necessari que hi hagi moviment relatiu entre el capçal de soldadura i les peces. Pel que es pot emprar en diferents tipus d'instal·lacions.
  - **Uns utilatges de posicionament:** El posicionament de les xapes és un tema crític, ja que la seva precisió es determina en desenes de mil·límetre. Destaca la precisió de l'ajust del posicionament entre xapes i del posicionament del feix làser respecte a la junta a soldar.
  - Un lloc d'aplicació.
- **Sistemes auxiliars:** entre els quals destaca el sistema de refrigeració, que poden ser circuits d'aigua o un flux continu de barreja de gasos, depenent de la tecnologia constructiva empleada i de la manera d'excitació.

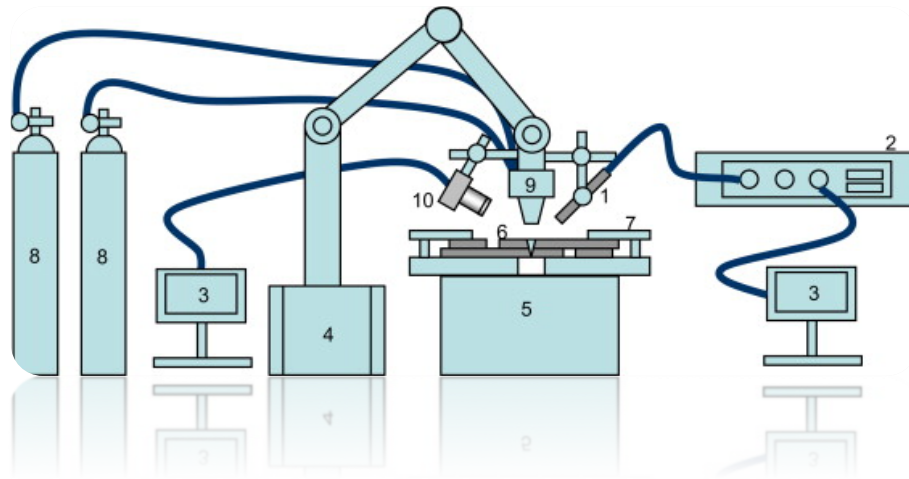


Figura 67. Esquema d'un robot controlat per l'equip de soldadura làser amb un espectròmetre i un sistema de càmera de seguiment.

Font: <http://www.indiamart.com>.

De la figura:

1. Lent col·limadora.
2. Espectròmetre.
3. Ordinador.
4. Robot de control del sistema.
5. Taula de treball.
6. Mostra.
7. Agafadors.
8. Gas protector.
9. Cap de soldadura làser.
10. Càmera de seguiment.



Figura 65. Exemple equip de soldadura làser.

Font: <http://www.indiamart.com>.

### **2.7.6. Posicions de soldadura**

En l'ús de la soldadura làser s'aconsegueixen elevades velocitats de soldadura i cordons molt fins, tot això fa que les deformacions i les tensions creades en les peces siguin mínimes en comparació amb altres tècniques. A més la zona tèrmicament afectada és inapreciable. Mitjançant la combinació de diversos paràmetres del làser i el moviment tridimensional del robot, es poden realitzar soldadures en tot tipus de geometries.

En quant a la geometria de les juntes d'unió es destaquen les següents:

- Soldadura a topall.
- Soldadura a topall en vores rectes.
- Soldadura a topall en vores arrodonits.
- Soldadura en angle.
- Soldadura en vora.

### **2.7.7. Avantatges**

Els principals avantatges de la soldadura làser son:

- El làser, en ser llum, no té inèrcia, afavorint arrencades i parades ràpides.
- Alta localització de l'energia i baixa aportació tèrmica.
- Mínima zona afectada per la calor (ZAT).
- La deformació de les peces és menor.
- Alta velocitat de soldadura i bona penetració.
- S'aconsegueixen cordons d'alta qualitat amb altes resistències de tracció i fatiga.
- No és necessari l'ús d'elèctrodes i el material d'aportació és opcional.
- Altes taxes de producció.
- Es pot accedir a zones difícils d'aconseguir amb altres tècniques.
- Es pot usar en la soldadura de materials difícils, com per exemple el titani.

### **2.7.8. Inconvenients**

- L'inconvenient més destacable és el alt cost dels equips.
- En ser equips molt automatitzats i altament precisos requereixen una tecnologia molt alta.
- Els equips tendeixen a consumir una potencia molta alta.
- No es poden realitzar cordons molt amples.
- Dificultat en soldar materials amb alta reflexió.

### 2.7.9. Aplicacions de la soldadura làser

Des de que es van començar a utilitzar els primers làsers de baixa potència, el desenvolupament i aplicacions del làser en la indústria ha estat creixent. Aquest creixement està directament relacionat amb els avantatges que presenta la soldadura làser enfront de les tècniques convencionals de soldadura.

Els materials habituals que es solden per làser són els acers al carboni amb baix contingut en carboni, acers inoxidables, titani, diversos aliatges de base níquel, coure, tungstè, alumini, plàstics, columbi i zirconi.

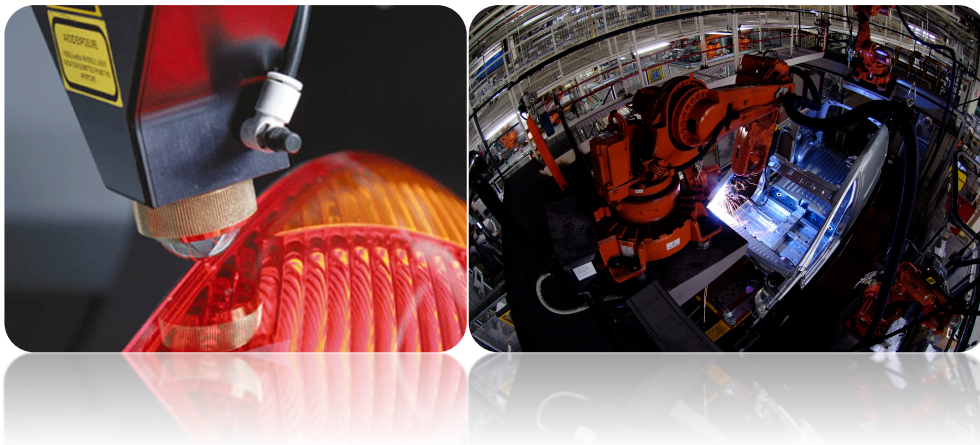


Figura 68. Aplicacions soldadura làser.

Font: <http://www.spilasers.com>.

La soldadura làser és una tècnica realment competitiva quan es tracta de peces en sèrie a causa del seu grau d'automatització. Tot i que és evident que qualsevol peça de precisió es pot veure beneficiada amb aquesta tècnica, ja siguin peces mecanitzades, estampades o peces de xapa fina.

Els camps d'aplicació de la soldadura làser són molt amplis, així els sectors com l'automoció estan incorporant aquestes tècniques de manera generalitzada per ser un procés crucial en les línies d'assemblatge de les peces de xassís d'automòbils.

Els equips més habituals per a la soldadura en la indústria de l'automòbil, són els de potència entre 5 i 10 kw d'òptica fixa i moviment de la peça. Generalment, aquests equips requereixen de taules pòrtic de fins a 5 eixos o de braços robots. Aquesta necessitat d'infraestructura, encara que suposa una major inversió, està substituint a les actuals instal·lacions de soldadura per punts per a la soldadura de xapes de carrosseria, a causa dels avantatges d'aquestes.

En General Motors, s'empra la soldadura làser per a la soldadura de sostres, marcs de finestretes, passos de rodes, travessers, carrosseria, etc.

Així en els últims temps, sectors com el ferroviari estan trobant aplicacions molt adequades per a aquesta tècnica. També s'està incorporant en el sector aeronàutic i la medicina.

L'aplicació d'aquest procés és òptim en camps com el petroquímic i el sector naval, en eines sotmeses a desgast, en intercanviadors de calor, cargols de bombes, matrius de forja, pistons, seients de vàlvules, rodets de laminació, pales d'agitadors, àleps de turbines, eixos de rotació, accessoris de tall, perforadores i motlles en la indústria del vidre.

La utilització del làser en drassanes està en creixement pel tall amb làser ja que està reemplaçant a les tècniques de tall amb oxiacetilènica i plasma, a causa de l'estalvi en costos, a la seva precisió i flexibilitat. El revestiment làser per a reparacions s'ha aconseguit amb l'acer, níquel, alumini i aliatges basats en cobalt. Els procediments s'han qualificat per a la reparació d'articles, com a eixos de bombes de refrigeració dièsel, seients de vàlvules de vapor, components de catapultes de portaavions i seccions d'alumini de l'armadura de torpedes.

En molts casos, el procés làser ha estat seleccionat a causa de la baixa dissolució i entrada de calor, per la qual produeix un dipòsit de material gairebé pur amb poc impacte tèrmic en la peça. Les reparacions es justifiquen a causa del cost alt de la substitució de les peces i els llargs terminis de lliurament requerits per qualificar a nous proveïdors i rebre les peces de substitució.

Una altra aplicació interessant és la soldadura de xapes planes de diferent composició i espessor, aprofitant d'aquesta manera els avantatges que aporten cadascun d'aquests metalls a l'element estructural soldat.

S'espera un ventall d'aplicacions que vagin sorgint en els propers anys gràcies a aquests sectors.

## 2.8. Soldadura per Plasma

Abans d'explicar aquest tipus de soldadura s'explicarà què és el plasma, doncs no és un concepte fàcil d'entendre degut a que no existeixen exemples naturals i també per les baixes temperatures existents i les altes densitats en que es manifesta la matèria.

El plasma és un estat de la matèria en el qual pràcticament tots els àtoms estan ionitzats i amb la presència d'una certa quantitat d'electrons lliures, no lligats a cap àtom o molècula. És un fluid, format per electrons, i ions positius. Això fa que el plasma sigui conductor elèctric i que respongui fortament als camps electromagnètics. El plasma presenta unes propietats diferents de les dels sòlids, líquids, i gasos, de manera que és considerat com un altre estat de la matèria.

Pot presentar-se de diferents maneres: com a núvols gasosos neutres, com s'observa en cas de les estrelles; en forma de gas, el plasma no té una forma o un volum definits però sota la influència d'un camp magnètic pot formar estructures com raigs de ions o bé com a suspensions de partícules de l'ordre del nanòmetre o el micròmetre.

El plasma s'identifica mitjançant dos dels paràmetres que els diferencien, y que son:

- La densitat electrònica  $\left(\frac{\text{electrons}}{m^3}\right)$ .
- La temperatura cinètica dels electrons (Electron-Volt).

Així doncs, el plasma es diferencia radicalment dels altres estats de la matèria ja que és un gas de partícules carregades i neutres i que exhibeix un comportament col·lectiu.

La soldadura per plasma coneguda tècnicament per les seves sigles PAW (Plasma Arc Welding), utilitza bàsicament els mateixos principis que la soldadura TIG. No obstant és un sistema més desenvolupat pel fet de proporcionar un augment de la productivitat i aconseguir una densitat energètica i temperatures superiors.



### 2.8.1. Tipus de plasmes

Genèricament, es poden diferenciar els plasmes en funció de la temperatura i la pressió dels elèctrodes i del gas que el forma. Es classifiquen dos grups:

- Els plasmes tèrmics o d'equilibri.
- Els plasmes freds o de no equilibri.

El plasma fred és aquell que presenta un rang de pressions baix i la temperatura dels electrons és major que la del gas, inferior als 1000K. Pel contrari, el plasma tèrmic es aquell que a mesura que s'augmenta la pressió, la temperatura dels electrons i del gas son similars. Pot arribar a temperatures superiors als 3000K.

### 2.8.2. Procés de soldadura

El procés de soldadura per plasma, com s'ha mencionat anteriorment, es com una variant de la soldadura per arc elèctric on l'energia del arc s'utilitza per dur el gas que l'envolta a l'estat de plasma. L'energia per aconseguir la ionització l'aconsegueix l'arc elèctric que es forma entre l'elèctrode de tungstè, o aliat amb tori, i el metall base a soldar. La soldadura pot realitzar-se amb o sense aportació de metall.



Figura 69. Soldadura per plasma.

Font: <http://spanish.alibaba.com>.

En la soldadura per plasma s'utilitza un gas, generalment argó pur, que passa a estat plasmàtic per mitjà d'un orifici de reducció. Aquest orifici escanya el pas del gas i aconseguix augmentar la seva velocitat.

Seguidament és dirigit al metall que es desitja soldar en forma de raig concentrat que pot aconseguir una temperatura entre 20.000 i el 28.000°C.

El flux de gas de plasma no protegeix l'arc. El bany de fusió i el material son exposats a l'escalfament de l'atmosfera, per la qual cosa s'utilitza un segon gas que protegeix la zona de treball. Els elèctrodes utilitzats per la soldadura per plasma són generalment fabricats amb tungstè sinteritzat.

Així doncs, el sistema de soldadura per plasma presenta dos fluxos independents de gas. Per una banda el gas plasmàtic que flueix al voltant de l'elèctrode de tungstè, formant el nucli de l'arc plasma i per l'altre el gas de protecció que proporciona la protecció al bany de fusió.

### 2.8.3. Mètodes operatius

La soldadura per plasma s'utilitza principalment en unions d'alta qualitat. Aquest tipus de soldadura no contamina el metall base, no produeix escòria i es pot utilitzar per soldar els mateixos materials que es solden amb TIG, altres aliatges i materials molt prims.

Una de les grans avantatges que presenta la soldadura per plasma, al igual que la soldadura làser o la de feix d'electrons, es la possibilitat de treballar en diferents models operatius. En aquest cas són:

- Mètode de fusió
- Mètode de forat

El **mètode de fusió** segueix el mateix fonament que els processos d'arc elèctric tradicionals. Dins d'aquest es pot classificar en dues modalitats:

- Soldadura micro-plasma, amb corrents de soldadura des de 0.1 Amp. fins a 20 Amp.
- Soldadura mig-plasma, amb corrents de soldadura des de 20 Amp. fins a 100 Amp.

Dintre dels avantatges d'aquest procés destaquen:

- Una velocitat de soldadura alta.
- Aconsegueix una bona estabilitat de l'arc i poca distorsió en les unions.
- La distancia entre la peça a soldar i la torxa es menys crítica.

El **mètode de forat** treballa a altes intensitats per sobre dels 100 Amp. i amb potències mínimes de l'ordre de  $10 \frac{Kw}{mm^2}$  en la qual l'arc de plasma penetra en tot l'espessor del material a soldar.

En aquest tipus d'unió, la qualitat de la soldadura depèn de la estabilitat del forat, íntimament relacionat amb la intensitat de la corrent de l'arc i la velocitat de treball que han de mantenir-se constants.

En aquest procediment es poden soldar d'una sola passada espessors relativament elevats de 9 mm en acers i 16mm en titani, espessors que són difícilment soldables per altres processos d'arc elèctric en una sola passada. Enfront a processos d'alta densitat energètica, com el làser o el feix d'electrons, aquest procés és el que requereix la menor inversió i provoca poca distorsió en las peces a soldar.

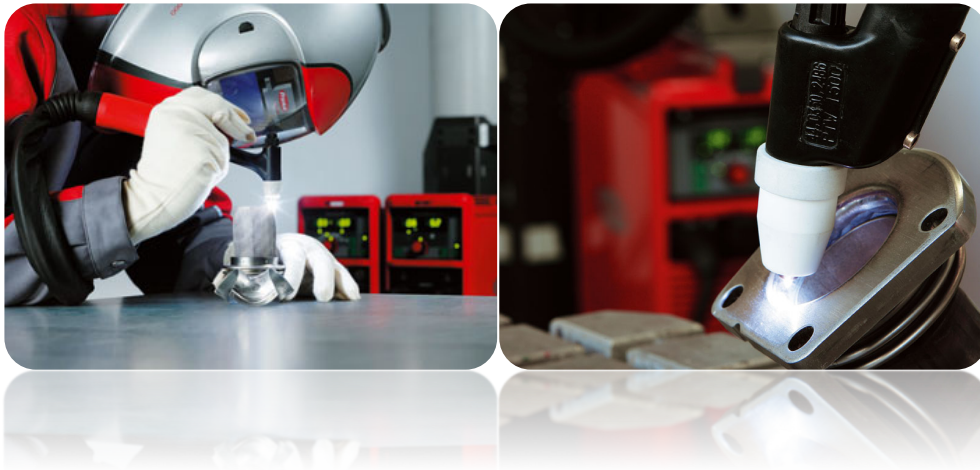


Figura 70. Exemple mètode de fusió, soldadura micro-plasma.

Font: [www.fronius.com](http://www.fronius.com).

#### 2.8.4. Parts de la soldadura per plasma

La soldadura per plasma es compon bàsicament per:

- Gasos, els quals flueixen embolicant l'elèctrode de tungstè. Generalment argó o heli.
- L'elèctrode de tungstè, que és el principal ajudant durant el procés de soldadura.
- Metall base, que pot ser qualsevol metall comercial o diversos aliatges.
- Dipòsit de gas, que pot ser de ceràmica, de metall d'alta resistència d'impacte o refredat per aigua.

- La font de poder, CAAF<sup>29</sup>, CDPD<sup>30</sup> o CDPI<sup>31</sup>.
- Metall d'aportació, però només si es compta amb ell, perquè no és indispensable per a la soldadura.

L'equip necessari per a la soldadura per plasma és similar al que s'utilitza en la soldadura TIG.

A més, s'ha d'incloure la pistola que s'utilitza. Aquesta disposa d'un conducte al voltant de l'elèctrode, pel qual circula el gas plasmàtic, amb un estrangulament en l'extrem de sortida per accelerar el doll. El gas protector circula al voltant del gas plasmàtic per un conducte concèntric.

Per evitar l'excessiu escalfament, el filtre disposa d'un sistema de refrigeració de la punta, per aigua.

### **2.8.5. Avantatges**

El major avantatge del procés PAW és que la seva zona d'impacte és dues o tres vegades inferior en comparació a la soldadura TIG, per la qual cosa es converteix en una tècnica òptima per soldar metall d'espessors petits. Tot i així presenta altres avantatges importants:

- Arc excepcionalment estable, permetent l'ús de corrent de 0,1 A.
- Concentració de l'energia en una zona molt reduïda.
- Penetració controlada a través del valor del flux. Deformació mínima de la peça a soldar per la concentració d'energia tèrmica.
- Forma cilíndrica de l'arc transferit amb el que s'eviten els efectes negatius que apareixen en canviar la distància entre la torxa i la peça a soldar.
- Facilitat d'operació en poder estendre's l'arc a 10-15 mm de longitud.
- Possibilitat de treballar amb facilitat amb aportació de material.
- Mínima preparació de vores.
- Excel·lent qualitat en els cordons.

### **2.8.6. Inconvenients**

Un dels principals inconvenients que presenta la soldadura per plasma és que hi ha metalls difícils de soldar amb aquesta tècnica. Entre aquests s'inclouen el bronze, el ferro colat, el plom i el magnesi.

---

<sup>29</sup> CAAF: corrent altern d'alta freqüència.

<sup>30</sup> CDPD: corrent directe i polaritat inversa.

<sup>31</sup> CDPI: corrent directe i polaritat directe.

Altres limitacions que en presenta, són l'equip costós i un bufador més gran que els utilitzat en altres operacions de soldadura amb arc elèctric. Això tendeix a limitar l'accés en algunes configuracions d'unió.

### 2.8.7. Aplicacions de la soldadura PAW

Industrialment el mètode de forat es fa servir a la soldadura d'acers inoxidables austenítics, a la fabricació de vàlvules i bombes, en tubs o tancs d'emmagatzematge per indústries alimentàries, químiques o productores d'energia.

En el mode de fusió els plasmes s'utilitzen en la indústria per soldadures de xapes i peces de petits espessors en grans produccions.

La soldadura per plasma conjugada amb la soldadura per fricció s'ha emprat en la soldadura dels dipòsits de combustible del "Space Shuttle" i comportà un dels majors avenços en el món de l'enginyeria.

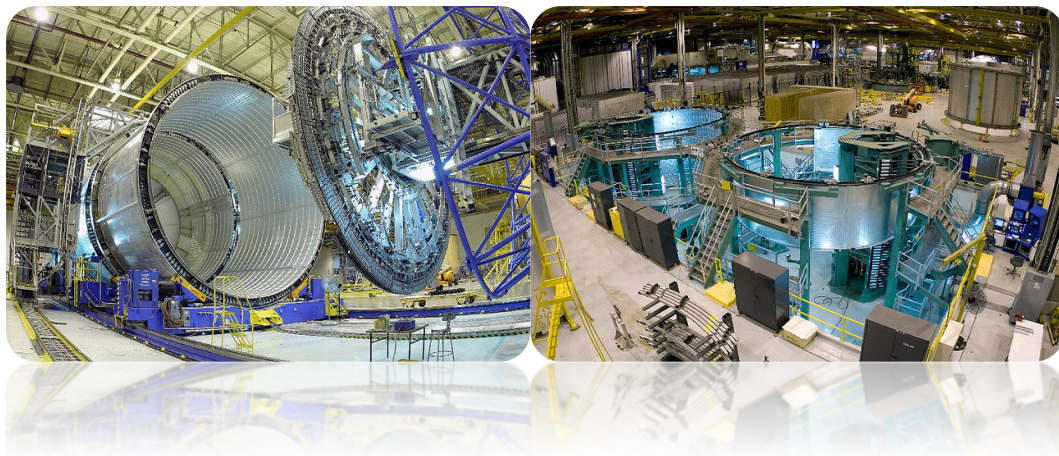


Figura 71. Zona de treball de soldadura del 'Space Shuttle'.

Font: <http://www.flickr.com>.

Una aplicació molt comuna consisteix a realitzar revestiments a base de crom, níquel, cobalt, de peces que estaran sotmeses a temperatures elevades durant el seu funcionament. En aquests casos el metall d'aportació s'introdueix en forma de pols mitjançant un gas de transport. En aquesta aplicació s'utilitza com a gas protector l'argó amb un petit contingut en hidrogen, per tal de millorar la penetració i reduir la possibilitat de formació d'òxids.

Multitud de drassanes disposen de sistemes de plasma tan mecanitzat com manual. Els sistemes de plasma mecanitzat es munten en taules 2D on es tallen peces destinades a cascos i cobertes d'acer.

Els sistemes de doble gas deixen unes vores virtualment sense ferritja, de tal manera que la soldadura es fa més viable en front a les vores obtingudes mitjançant altres tipus de soldadura. Altres aplicacions són fabricació de discs, fabricació de peces components, instal·lació de canonades i ventilació, tall de xapes per a muntatge de motors, etc.

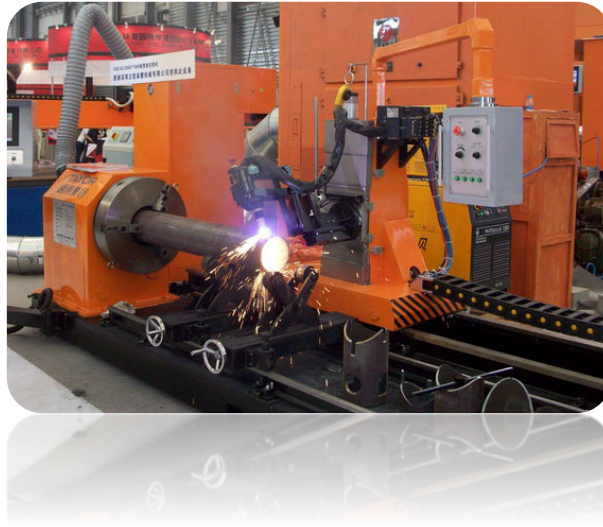


Figura 72. Aplicació soldadura per plasma.  
<http://www.millerwelds.com>.

## 2.9. La soldadura en la construcció naval

A principis del segle XIX, data on va començar la construcció de vaixells amb ferro forjat i la invenció de la propulsió a vapor, es va iniciar la substitució de les embarcacions de fusta i de la navegació a vela. Això va estimular una ràpida evolució de la construcció naval.

L'acer es va introduir, imposant-se al ferro forjat, sobre el 1870. Va ser publicat en el 1877 per la Lloyd's Register of Shipping on sortien les normes per vaixells d'acer i regulava els mètodes de construcció naval amb aquest material.

Des de 1920 en que es va construir la primera embarcació totalment soldada a Anglaterra, la soldadura ha substituït en avantatge, en fiabilitat i alliberament de pes al rebló i al calefactat en la construcció naval. Va quedar com la principal tècnica d'unió de metalls per les embarcacions.

Las dues Guerres Mundials van donar l'impuls definitiu a la implantació de la soldadura en l'indústria, mostrant-la com una solució ràpida, econòmica i fiable per les unions de metalls. Tot i l'avanç que això va suposar es va posar de manifest els problemes que presentava la ruptura fràgil per dissolució del hidrogen en el cordó de soldadura i es van produir grans fracassos, especialment en una quarta part dels 5000 vaixells de la sèrie Liberty, fabricats a Estats Units. Aquests van presentar trencaments importants que van obligar a desenvolupar el coneixement de la metal·lúrgia, de la soldadura i a aplicar mètodes d'inspecció de l'obra soldada.

Actualment les drassanes han incorporat les noves tècniques de soldadura que permeten obtenir soldadures de qualitat, millorant els mètodes i temps de producció.

En el tall de planxes i preparació de vores, al clàssic sistema de tall oxiacetilènic s'han incorporat el tall per plasma i tall per làser, millorant-se els sistemes de traçat, incorporant als equips de tall lectors òptics i sistemes de control numèric que donen qualitat al dimensionament i baixen els costos finals en automatitzar el procés.

En els procediments de soldadura s'apliquen, a més de la soldadura elèctrica manual i oxiacetilènica, la soldadura automàtica o per arc submergit, soldadura semiautomàtica amb protecció de  $CO_2$  o argó, soldadura TIG, soldadura per electró-escòria, per plasma i per resistència.



Aquests procediments, units a sistemes de mecanització, automatització i robotització que se'ls adapten, han aconseguit que les drassanes que els han incorporat plenament hagin reduït temps i millorat les prestacions, sent els més competitius del mercat.

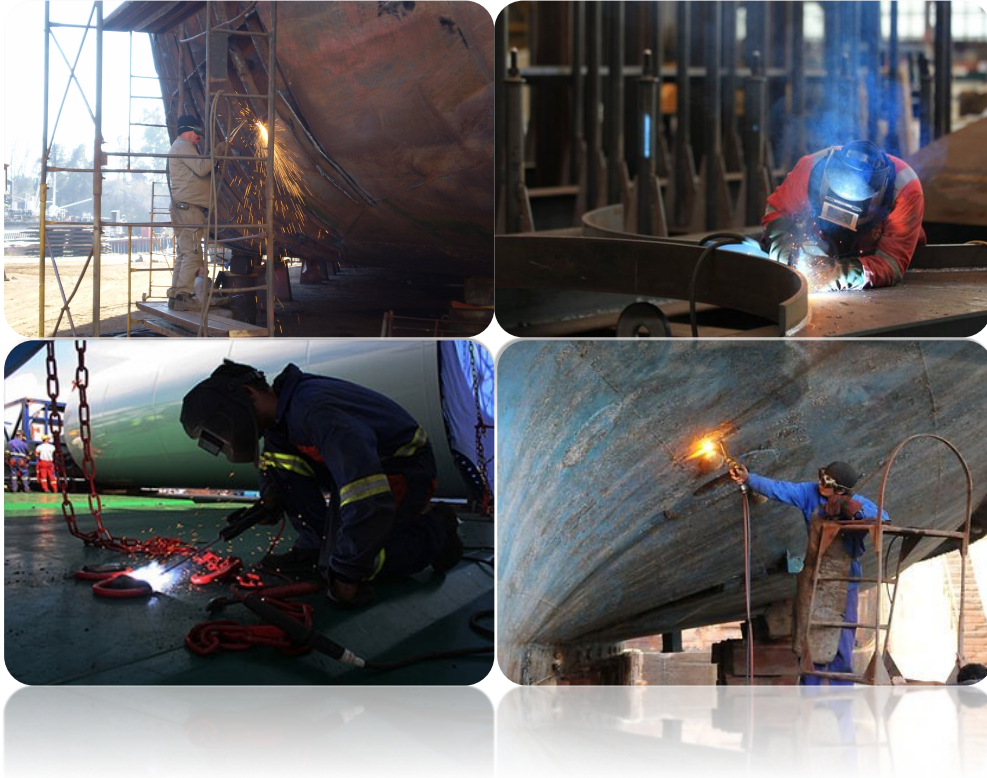


Figura 73. Aplicacions de soldadura en la construcció naval.  
<http://www.weldingschool.com>.

La tècnica de la soldadura ha evolucionat d'una forma continuada en els últims anys, doncs de ser emprada principalment en la unió de planxes d'acer i pels mètodes clàssics de soldadura elèctrica manual i oxiacetilènica, ha anat adoptant-se a la soldadura de nous aliatges. El fet de que a les unions soldades se'ls exigeixen majors prestacions i fiabilitats, ha obligat a un estudi detallat de les condicions de la soldadura, mètodes a emprar, inspeccions i control de la soldadura, assajos de la unió per analitzar resultats i un estudi metal·lúrgic de la zona soldada.

Els nous mètodes de soldadura han canviat la imatge del soldador com a operari de gran habilitat manual i bon pols, per la d'un professional més tècnic que ha de manejar màquines més complexes per establir els paràmetres adequats, controlar els sistemes d'arrossegament automàtics, maneig de gasos de protecció, detecció de defectes, etc.



La complexitat de la tècnica i el nivell de qualitat exigida als treballs de soldadura requereix de diversos especialistes i tècnics que intervenen en les diferents fases de l'execució d'una obra soldada. La formació d'aquests operaris i tècnics és cada vegada més especialitzada i completa.

En el futur és d'esperar que s'incorporin a la construcció naval nous materials i noves tècniques de soldadura, donada la importància que aquesta té en el sector, així com es requerirà la creació de nous llocs de treball per a tècnics que duguin a terme la inspecció i control de la mateixa, la programació dels equips, l'estudi i disseny de nous procediments i mètodes de treball. El mercat exigeix una gran qualitat en els treballs i a preus competitius.

### **3. TÈCNIQUES D'UNIÓ PER ADHESIUS**

#### **3.1. Introducció i fonaments**

La tecnologia d'unió adhesiva és atractiva per la indústria perquè permet flexibilitat en la selecció de materials, el disseny del producte i la fabricació del mateix fins al seu assemblatge final. És una alternativa que neix a partir de l'aparició de nous materials aplicables en la construcció naval.

A més, la unió adhesiva exerceix una profunda influència en el cost de fabricació i la qualitat del producte, donant així un significatiu estalvi productiu i un avantatge competitiu pel que fa als mètodes tradicionals de fabricació. En aquest sentit, ha d'assegurar-se que la tecnologia s'aplica de la forma més efectiva possible i que els controls més apropiats s'executen en tots els aspectes operatius.

Es coneix amb el nom d'adhesiu a la substància que pot mantenir units a dues o més cossos per contacte superficial. La seva importància en la indústria moderna és considerable. Els adhesius són productes orgànics naturals o sintètics que són emprats per una gran varietat d'animals: teles d'aranya, capolls d'erugues, ous d'insectes adherits sobre fulles o branques, etc.

L'unir unes coses amb unes altres ha estat i és, una necessitat primordial de l'home, la qual inclou tots els sistemes i activitats productives en què intervenen els materials. Són productes complexos que necessiten per realitzar-se la col·laboració de diferents parts elementals, fabricades per separat, que finalment han de ser unides. Encara que l'adherència pot obeir a diferents mecanismes de naturalesa física i química com a magnetisme i forces electrostàtiques, des del punt de vista tecnològic els adhesius són els integrants del grup de productes, naturals o sintètics, que permeten obtenir una fixació de caràcter mecànic.

#### **3.2. Adhesió**

Es defineix l'adhesió com l'estat en el qual dues superfícies són mantingudes juntes mitjançant la unió de les seves cares. La cohesió, no obstant això, és l'estat que tendeix a associar entre elles a les partícules d'una substància mitjançant forces de valència o secundàries. L'enduriment és el procés el qual l'adhesiu desenvolupa la seva força de cohesió i, per tant, les seves propietats físiques i químiques.

L'adhesiu és descrit pel seu ús industrial com una substància amb capacitat de mantenir dos materials junts mitjançant l'adhesió de superfícies en el qual actuen dues forces essencials, l'adhesió i la cohesió:

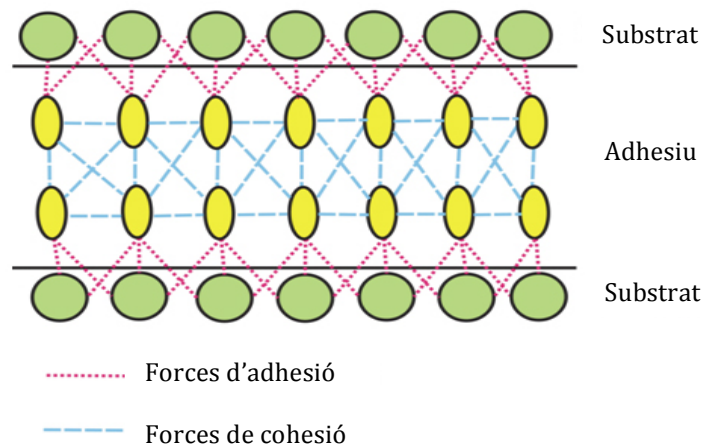


Figura 74. Estructura d'una unió adhesiva.

Font: <http://folk.ntnu.no>.

L'adhesió és la força d'unió que es produeix en la superfície de contacte de dos cossos en la qual hi ha una interacció d'aquestes superfícies.

L'adhesió depèn de tres factors:

- Mecànic (rugositat i acabat superficial).
- Físic (humectació del substrat).
- Químic (naturalesa i afinitat que existeix entre el substrat i l'adhesiu), sent interaccions electromagnètiques produïdes per variacions en la distribució d'electrons entre l'adhesiu i el substrat.

Encara que la neteja d'una superfície augmenta l'adherència, els factors que la modifiquen són:

- Afinitat de l'adhesiu pel material dels objectes que es van a unir. En alguns adhesius que contenen ingredients amb grups reactius, pot ser important l'afinitat de l'adhesiu amb la superfície, i en alguns casos es produeixen reaccions químiques.
- Tendència de l'adhesiu a mullar la superfície del material facilitant el contacte entre aquest i la superfície.
- Consistència i continuïtat de la matèria adhesiva.
- Tendència de l'adhesiu a penetrar la superfície del material.
- Espessor i flexibilitat de la capa adhesiva.

### 3.3. Cohesió

La cohesió és la força exercida com a atracció molecular que manté unides les partícules adjacents dins d'un mateix cos. Aquesta unió depèn de com es trobin distribuïts els àtoms, les molècules i els ions. Aquestes forces inclouen els enllaços interatòmics forts de les cadenes polimèriques i els enllaços intermoleculars febles (forces de Van der Waals) d'atracció entre diferents cadenes. La cohesió de l'adhesiu serà per tant la màxima resistència esperable en una unió adhesiva. La resistència d'una unió adhesiva s'avalua realitzant un assaig de trencament de la unió, podent ocórrer tres tipus de fallades de la unió adhesiva:

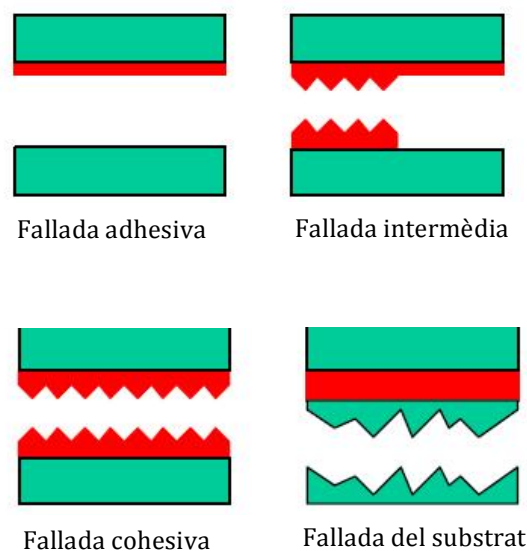


Figura 75. Tipus de fallades en les unions adhesives.

- **Fallada adhesiva:** Se separa el substrat de l'adhesiu, l'adhesiu no s'adhereix al substrat. Ha de canviar-se l'adhesiu o preparar el substrat. És difícil de detectar i no desitjable.
- **Fallada de cohesió:** Es produeix la ruptura de l'adhesiu. És preferible per mantenir la integritat dels substrats a unir. L'adhesiu ha estat mal triat, és la fallada menys perjudicial.
- **Fallada del substrat:** Es produeix la ruptura del substrat per estar la resistència de l'adhesiu i la seva adhesió al substrat sobredimensionat enfront dels esforços a transmetre. És la fallada més destructiva.
- Fallada per combinació de les mencionades anteriorment.

### **3.4. Avantatges dels adhesius en front als mètodes tradicionals d'unió**

La distribució d'esforços aconseguida mitjançant la unió adhesiva és molt més uniforme a tota la superfície d'unió. Això implica un augment de la resistència estàtica i dinàmica i aconseguix una distribució i absorció uniforme de les càrregues, mentre que la unió mitjançant soldadura i reblat provoquen punts localitzats de tensió.

No es produeixen canvis en la superfície i textura dels materials units, en canvi, si es tracta de soldadura, les temperatures poden variar la textura i provocar variacions en les propietats mecàniques dels materials. Tant la soldadura com el reblat i cargolat alteren l'aspecte visual de les peces.

En trets generals els avantatges serien els següents:

- Estalvi de pes: els adhesius permeten construccions més lleugeres on s'han d'unir peces de parets primes (espessor < 0,5mm).
- Unions segellades: els adhesius actuen com segelladors, eviten la pèrdua de pressió o de líquids, impeding la penetració d'aigua de condensació i protegint contra la corrosió.
- Unió de materials diferents i disminució del risc de corrosió: l'adhesiu forma una pel·lícula aïllant que evita la corrosió galvànica quan s'uneixen metalls diferents. Actua també com a aïllant elèctric i tèrmic.
- Proporciona unions elàstiques i amortidores de vibracions.

### **3.5. Desavantatges dels adhesius en front als mètodes tradicionals d'unió**

- Necessitat d'una bona preparació superficial.
- Temps de curat prolongat.
- Desmuntatge complexa.
- Resistència mecànica i resistència a la temperatura limitada.
- Falta d'assajos no destructius per tal de determinar el comportament de la unió.

### 3.6. Característiques especials de disseny de construccions unides amb adhesius

El comportament de les unions amb adhesius davant els esforços és diferent del de les unions soldades o reblades. Cal tenir en compte diverses especificacions:

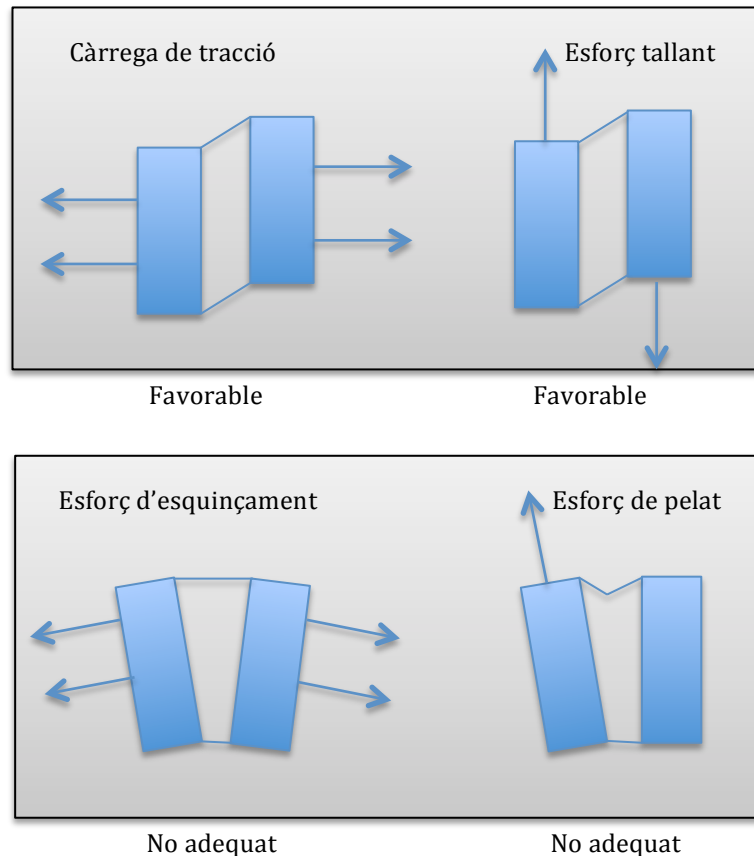


Figura 76. Esforços en les unions adhesives.

Font pròpia.

Per al disseny d'unions adhesives cal tenir en compte els següents punts claus:

- Les superfícies unides han de tenir la màxima amplitud superficial per tal de maximitzar la transmissió de càrregues.
- Les forces que actuen en la unió s'han de distribuir sobre tota la línia de la junta.

Tipus de junta adequades per unions amb adhesius:

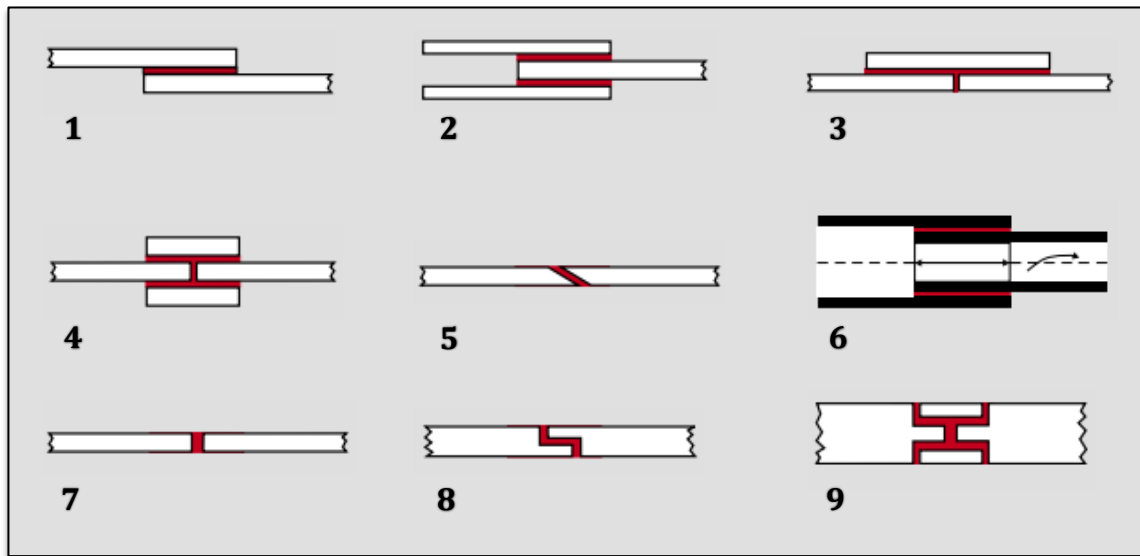


Figura 77. Tipus de junta per les unions adhesives.

Font pròpia.

1. **Junta solapada senzilla:** la més adequada per peces de poc espessor. Disseny senzill i bones propietats de resistència.
2. **Junta solapada doble:** unió amb molt bona resistència.
3. **Junta de banda senzilla:** s'utilitza freqüentment per obtenir superfícies llises sense altres treballs de preparació.
4. **Junta de banda doble:** proporciona més resistència que la banda senzilla, però és més complicada. S'utilitza en rares ocasions, ja que cap de les cares visibles es plana.
5. **Unió bisellada:** proporciona una excel·lent resistència, però és complicada d'executar i sols és possible amb substrats d'un determinat espessor.
6. **Càrregues a torsió o cisalla:** les juntes solapades o de banda en canonades de poc espessor sotmeses a torsió poden arribar a obtenir la mateixa resistència que els metalls units.

Els següents tipus de juntes son inadequats per unions adhesives:

7. **Juntes a topall:** inadequat per la baixa resistència.
8. **Junta solapada escalonada:** inadequat pel cost.
9. **Junta a topall amb reforç doble:** inadequat pel cost.

### 3.7. Classificació dels adhesius

Existeixen diferents classificacions dels adhesius, però en aquest cas, la classificació es basarà en el mecanisme de formació de la junta adhesiva. D'aquesta manera distingirem entre dos grups d'adhesius:

- Adhesius **pre-polimeritzats**, aquells en els que el polímer<sup>32</sup> existia abans de ser aplicat l'adhesiu sobre la unió.
- Adhesius **reactius**, que es caracteritzen perquè l'adhesiu en estat líquid, gel, etc. es troba constituït per monòmers que polimeritzen i/o es creuen durant el procés de polimerització<sup>33</sup>.

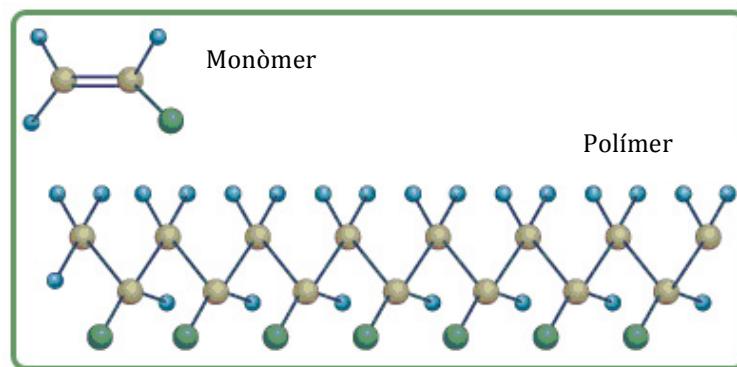


Figura 78. Representació monòmer i polímer.

Font: <http://www.esciencia.es>.

Dins d'aquests dos grups es poden distingir diversos subgrups:

#### Adhesius pre-polimeritzats

- En fase líquida.
  - Solucions aquoses.
  - Solucions orgàniques.
  - Emulsions o líquides com els adhesius en base PVC.
- En fase sòlida.
  - Adhesius “piezosensibles” com els adhesius de contacte o les cintes adhesives.
  - Adhesius termo-fusibles o hot-melts.

<sup>32</sup> Polímer: macromolècules (generalment orgàniques) formades per la unió de molècules més petites anomenades monòmers.

<sup>33</sup> Polimerització: procés pel qual s'obté un polímer a partir de la repetició d'un component base (monòmer).



### Adhesius reactius

- Curat mitjançant poliaddició com els ciano-acrilats, els anaeròbics o els acrílics.
- Curat mitjançant policondensació com els epòxids o les silicones.

#### 3.7.1. Adhesius pre-polimeritzats

Dins del grup d'adhesius pre-polimeritzats, existeixen diversos tipus, tant en fase líquida com en sòlida. En fase líquida, podem fer servir solucions orgàniques que solen ser lineals i adquireixen propietats elàstiques després de la vulcanització<sup>34</sup>.

En fase sòlida tenim, entre d'altres, els adhesius sensibles a la pressió (PSA), amb una reologia<sup>35</sup> especial que els permet deformar-se i mullar els substrats en estat sòlid, i els termo-fusibles o Hot-Melts, que humecten els substrats quan s'escalfen per sobre de la temperatura d'estovament.

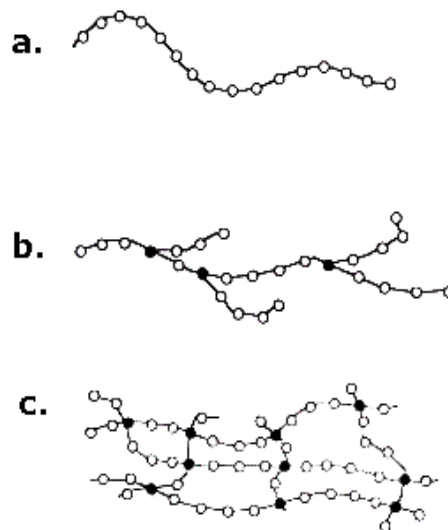


Figura 79. Disposició dels polímers. En ordre, lineal, ramificada i reticular.

Font: <http://envases.elenaibarreche.com>.

Els principis de l'adhesió són comuns a totes les famílies adhesives. No obstant, només els adhesius reactius són capaços de donar solucions fiables als problemes d'enginyeria.

<sup>34</sup> Vulcanització: procés que transforma els polímers lineals en polímers reticulars de naturalesa termostable.

<sup>35</sup> Reologia: és la part de la física que estudia la relació entre l'esforç i la deformació en els materials que són capaços de fluir.

### 3.7.2. Adhesius reactius

Es tracta d'aquells que polimeritzen durant la unió adhesiva, es a dir, quan es troben entre els substrats que es poden assemblar.

La profunditat de curat d'un adhesiu reactiu depèn del grau d'iniciació de la reacció de polimerització. En general, els adhesius monocomponents que curen mitjançant diversos sistemes d'iniciació superficial (presència de ions metàl·lics, presència d'humitat sobre les peces, humitat ambiental, ús d'activadors, etc.) presenten profunditats de curat limitades.

No obstant, els sistemes bicomponents, els quals inicien la polimerització en tot el seu volum, permeten profunditats de curat il·limitades.

L'adhesiu passa d'estat líquid a estat sòlid sense pèrdua de massa i amb inapreciables pèrdues de volum. Aquesta propietat és bàsica per tal de realitzar adhesions d'alt rendiment i condició indispensable per tal d'obtenir segellats fiables.

Al no existir solvent en la formulació són adhesius que no presenten problemes d'emissió d'agents inflamables, tòxics o perjudicials pel medi ambient.

El curat dels adhesius reactius té lloc mitjançant dos possibles mecanismes:

- **Poliaddició**

Les reaccions de poliaddició són les reaccions químiques en les quals el polímer s'origina mitjançant successives addicions de grups funcionals (monòmer A) a estructures moleculars amb dobles enllaços (monòmer B).

És a dir, partim d'una molècula que conté dobles enllaços (monòmer B), els quals mitjançant l'acció de la temperatura, pressió o algun agent químic trenquen el doble enllaç, és en aquest moment quan el monòmer A ocupa el lloc del doble enllaci addicionant-se a l'estructura i formant el polímer.

Una de les principals característiques de les reaccions de poliaddició és que durant el procés de formació del polímer no es desprèn cap compost volàtil, tal com és el cas de les reaccions de policondensació.

- **Policondensació**

Les reaccions de policondensació són aquelles reaccions químiques en les quals el polímer s'origina mitjançant successives unions entre monòmers, els quals emeten molècules condensades durant el procés d'unió.

Les molècules condensades que s'emeten a l'ambient a causa del procés de policondensació, depèn de la naturalesa dels monòmers que s'uniran per donar origen al polímer. Per exemple en els adhesius amb base silicona de 2 components quan es produeix la reacció de policondensació, durant la fase de curat, aquests emeten alcohols a l'ambient.

Les molècules condensades que s'originen durant el procés de policondensació són molècules de baix pes molecular com aigua, clorur d'hidrogen, alcohols, amoníac, etc., les quals es troben en estat gasós, separant-se del polímer resultant evaporant-se. Un important efecte que té el tipus de polimerització sobre els sistemes adhesius és el relacionat amb els temps de manipulació i de curat. Les poliaddicions són reaccions en cadena i tenen velocitats elevades de reacció. Pel contrari, les policondensacions són reaccions lentes que produeixen un increment gradual i continu de la viscositat del sistema adhesiu.

Els adhesius anaeròbics, els ciano-acrilats i els acrílics curen segons un procés de poliaddició. Per aquest motiu el lapse de temps entre la viscositat inicial detectable i la resistència a la manipulació d'aquests adhesius és molt curt en comparació amb el d'epòxids o poliuretans que curen mitjançant policondensacions.

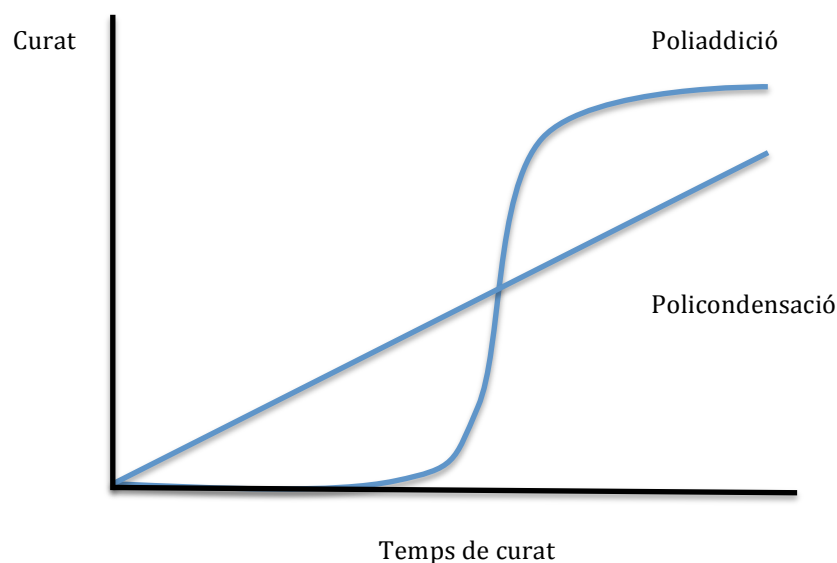


Figura 80. Diferències de viscositat en els processos de curat de policondensació i poliaddició.

Font pròpia.

En el cas dels epòxids, l'adhesiu es més espès fins que arribat un cert punt no es recomana la reposició, inclús molt abans de que s'arribi al temps de manipulació. En el cas dels acrílics la reposició és possible abans de que s'arribi a consumir el 80% del temps de fixació. Un cop que l'acrílic té una viscositat evident la resistència a la manipulació s'aconseguirà en poc temps, després del qual no s'aconsella la reposició. Amb els epòxids i poliuretans és possible una certa reposició inclús després d'un apreciable increment de la viscositat.

Un dels paràmetres que té efecte directe sobre el grau de polimerització és la velocitat de polimerització. En les reaccions de poliaddició ve determinada fonamentalment per l'etapa d'iniciació. Quan es generen nombrosos punts de creixement per les cadenes polimèriques s'incrementa la velocitat de polimerització però, al mateix temps, disminueix el grau de polimerització. Els polímers que resulten tenen pitjors propietats mecàniques.

Això s'observa clarament en els adhesius que, com a regla general, donen lloc a unions més resistents a mesura que disminueix la velocitat de curat. Aquesta comparació només és vàlida per a adhesius del mateix tipus.

#### **3.7.2.1. Adhesius reactius rígids**

Els adhesius reactius rígids es caracteritzen per generar unions d'elevada rigidesa.

Les famílies més importants es poden classificar segons la seva capacitat per omplir buits:

- Adhesius reactius per substrats coincidents.
  - Anaeròbics.
  - Ciano-acrilats.
- Adhesius reactius rígids amb capacitat d'ompliment de folgança.
  - Epòxids.

Tot i que tots ells poden presentar deficiències en aplicacions dinàmiques o en front a esforços de pelat, existeixen versions tenaces de tots ells que milloren el seu comportament en aquestes situacions.

## Anaeròbics

Els adhesius i segelladors anaeròbics són substàncies que no reaccionen en presència d'oxigen (aire), però que polimeritzen en absència d'aire i presència de ions metàl·lics. Aquests productes tenen nombroses aplicacions en aquells muntatges en els que l'esforç dominant és el tallant.

En general manquen de resistència a la tracció, al impacte i al pelat necessàries per al seu ús amb fins estructurals. Existeixen, no obstant, certes formulacions anaeròbiques en base de metacrilats d'uretà<sup>36</sup>, els quals contenen segments "rígids" i "flexibles" en les seves molècules i que tenen aplicacions com adhesius estructurals.

Els adhesius anaeròbics són ideals per al seu ús en muntatges metàl·lics. La superfície dels metalls, rica en ions, afavoreix la generació de radicals lliures en la seva reacció amb els peròxids presents en la formulació de l'adhesiu.

No obstant, els substrats metàl·lics presenten diferents nivells d'activitat:

- Superfícies actives com acer, llautó, bronze, coure, ferro, etc.
- Superfícies passives com acers d'alt aliatge, alumini, níquel, zinc, estany, plata, or, capes d'òxid, capes de cromat, revestiments anòdics, acer inoxidable, etc.



Figura 81. Exemple aplicació adhesiu anaeròbic.

Font: <http://www.anaerobicos.com>.

<sup>36</sup> Uretans: són sòlids cristal·lins de punt de fusió ben definit, emprats en anàlisi química per a la caracterització d'alcohols.

Quan les superfícies dels substrats metàl·lics són passives es pot fer servir un agent químic que supleixi l'absència de ions desencadenants de la reacció de polimerització. Aquest agent s'anomena "activador". Els temps de curat són elevats amb metalls passius. La corrosió i brutícia superficials eviten el contacte del ions amb l'adhesiu anaeròbic, inhibint la reacció. Els substrats no metàl·lics (plàstics, ceràmiques, fusta, vidre, etc.) també requereixen activació.

Els adhesius anaeròbics poden curar també per efecte de la calor. Així després d'escalfar la línia d'unió durant 3-5 minuts s'observa un inici del procés de curat. La polimerització completa es pot aconseguir escalfant entre 120°C i 150°C durant 30 min. Existeixen a més formulacions d'adhesius anaeròbics que, un cop curat l'adhesiu, incrementen la seva reticulació per efecte de la calor millorant la resistència mecànica.

Un cop curats, els adhesius anaeròbics presenten les següents característiques:

- Molt bona resistència al tallant i compressió.
- Bona resistència a la temperatura (de -55°C fins a un màxim de 230°C).
- Curat ràpid.
- No precisa un acabat superficial excepcional (es recomanen rugositats de 0,8-3,2 mm RA).
- Efecte segellador amb molt bona resistència química.
- Bona resistència a les vibracions.
- Bona resistència a les carregues dinàmiques.
- Adequats per substrats metàl·lics.

Algunes de les desavantatges són les següents:

- Els adhesius anaeròbics estàndard presenten resistències a tracció i pelat pobres. Els anaeròbics estructurals tenaços suporten tals tensions.
- Necessiten activadors sobre substrats passius o no metàl·lics.

Les característiques úniques dels adhesius anaeròbics fan que aquests productes siguin ideals per a certes àrees d'aplicació específica:

- Fixació de rosques.
- Segellat de rosques.
- Retenció de peces cilíndriques
- Segellat i acoblament de brides
- Impregnació de peces

Les versions tenaces dels anaeròbics, milloren la resistència a la tracció, al pelat i a l'esquinçament de les unions, a més de conferir una adequada estructura a les adhesions.

### **Ciano-acrilats**

Els ciano-acrilats, com es denomina als adhesius instantanis presenten excepcionals característiques adhesives. Per això i per la comoditat del seu ús s'han convertit en una de les solucions més comuns als problemes d'assemblatge entre materials molt diversos.

Els ciano-acrilats són adhesius monocomponents que polimeritzen ràpidament quan són empresonats en forma de pel·lícula fina entre dos substrats. En estat fluid els adhesius en base ciano-acrilat es troben compostats per monòmers reactius, estabilitzats en medi àcid dèbil. La polimerització dels monòmers de ciano-acrilat té lloc per via aniònica quan apareixen centres iniciadors bàsics.

Això passa en presència de compostos dèbilment bàsics, com amines, alcohols o la mateixa aigua. Tals substàncies, en concentració suficient, generen els nuclis sobre els que es va addicionant unitats monòmers, creant cadenes polímeres i fent que el fluid passi a estat sòlid.

Quasi tots els substrats contenen humitat absorbida sobre les seves superfícies, i aquesta humitat proporciona ions hidroxil que serviran com iniciadors de la polimerització aniònica. Quan una gota de ciano-acrilat és comprimida o estesa entre dos superfícies, la fina pel·lícula resultant entra en contacte amb les traces d'humitat absorbides a la superfície dels substrats, donant lloc a una ràpida iniciació de la polimerització.

Quant més fina és la pel·lícula de ciano-acrilat més ràpidament es produeix el seu curat. Una gota o cordó de ciano-acrilat situat en una superfície normal no àcida romandrà líquida durant molt de temps. No obstant, quan sigui estesa o pressionada en una fina pel·lícula, la polimerització tindrà lloc ràpidament.

Els ciano-acrilats no polimeritzen tan ràpidament en grans buits a no ser que s'apliqui un activador en la superfície d'adhesió o sobre el mateix adhesiu. Les formulacions viscoses només són efectives en buits de fins a 0,1 mm aproximadament si no es fa servir un activador superficial, el qual s'ha d'aplicar sobre una o ambdues superfícies mentre que l'adhesiu només s'aplica sobre una d'elles.



Figura 82. Exemple de segellament amb ús d'adhesiu anaeròbic.  
<http://www.anaerobicos.com>.

Quan les superfícies a adherir són àcides, és necessari l'ús d'un activador superficial o d'una formulació insensible a la superfície per tal d'obtenir temps de fixació curts. Tot i això, l'ús d'activadors superficials no sol ser necessari per a la majoria dels substrats dels quals donen lloc a velocitats de fixació suficientment ràpides per a la majoria de les aplicacions. L'ús d'activadors superficials no dona lloc a adhesions més fortes, sinó únicament a temps de manipulació més curts. Entre els avantatges ofertes per els ciano-acrilats tenim les següents:

- Alta resistència a tallant, tracció i compressió.
- Necessitat de quantitats petites d'adhesiu per formar adhesions fortes.
- Adhereixen una gran varietat de materials, incloent la majoria dels plàstics.
- Bona resistència química.
- Formen adhesions virtualment incolores si s'eviten els excessos.

Com la resta dels materials adhesius, els ciano-acrilats presenten limitacions. Es poden resumir entre les següents:

- Tenen capacitats d'ompliment de buits limitada (normalment 0,2mm).
- Resistència pobre al impacte i al pelat sobre els substrats rígids amb l'excepció dels ciano-acrilats tenaços.
- Resistència pobre a la humitat sobre substrats metàl·lics, millorada únicament pels ciano-acrilats tenaços.
- Les formulacions de ciano-acrilats tenaços suporten fins als 120°C en alguns casos. La temperatura màxima a la que poden ser exposats és de 80°C. Les exposicions prolongades a temperatures superiors condueixen a la pèrdua progressiva de la resistència.
- El "blooming" o entelament causat per la volatilitat del monòmer.
- No adhereixen substrats vítrics.



Per la seva rapidesa i comoditat d'ús, els ciano-acrilats són adhesius ideals per processos automatitzats d'assemblatge. El seu caràcter mini component permet que puguin ser aplicats mitjançant senzills sistemes de dosificació, els quals poden ser acoblats a les corresponents estacions dins de la cadena de producció. Un dels sectors de major consum de ciano-acrilats és el de l'automoció.

## Epòxid

Els epòxids són adhesius normalment bicomponents en forma de resina més activador. Un cop pre-barrejats la polimerització comença lentament per la qual cosa han de ser aplicats sobre les peces a unir i mantenir els substrats en posició fins arribar a la resistència a la manipulació.

En el passat la majoria dels epòxids es formulaven com a bicomponents que devien ser barrejats immediatament abans de fer-los servir i tenien una vida de barreja limitada. A l'actualitat existeixen adhesius epòxid monocomponents amb un agent enduridor latent que s'allibera únicament per reacció a alta temperatura.



Figura 83. Exemple de recobriment superficial amb ús d'adhesiu epòxid.

Font: <http://adhesivoselm.blogspot.com.es>.

Aquests adhesius van ser comercialitzats en 1975. Per sota de la ' $T_g^{37}$ ' de la mescla (per sota de  $0^{\circ}\text{C}$ ) no es produeix cap reacció. Al augmentar la temperatura comença la policondensació de la resina.

---

<sup>37</sup>  $T_g$ : és la temperatura de transició vítria. És un punt intermedi de temperatura entre l'estat fos i l'estat rígid del material.

Els epòxids utilitzats en aplicacions estructurals han de ser curats a temperatures altes o a temperatura ambient amb post-curat per calor. L'avantatge del post-curat com operació independent, inclús en el cas de juntes ja curades amb una mica de calor, és que pot ser realitzat sense l'ús de sistemes de subjecció o sistemes d'escalfament amb premses hidràuliques.

Al passat, l'interès es centrava en els epòxids tenaços. Aquests materials incorporaven en la seva formulació un cautxú, generalment nitril, capaç de precipitar de forma micro-dispersa quan la resina endureix. Amb l'addició d'aquesta fase de cautxú es milloren les característiques de l'adhesiu curat en front a esforços de pelat, sobre tot a baixes temperatures en les que uns altres epòxids, com els nylon-epòxids, perden totes les seves característiques de flexibilitat. Els epòxids tenaços bicomponents van ser introduïts comercialment al 1973.

Tenen les següents propietats:

- Alta resistència a tallant, tracció i compressió.
- Resistència a temperatures de fins a 180°C (fins 250°C en algunes formulacions).
- Adhereixen quasi tots els substrats.
- Molt bona resistència química.
- Gran capacitat d'ompliment.
- Adhesius molt rígids.
- Tot i ser dielèctric i aïllant tèrmic, pot ser modificat per ser conductor de la calor i l'electricitat. A més es poden addicionar càrregues per tal de millorar les característiques mecàniques (com la fibra de vidre) o per disminuir la densitat (com microesferes pneumàtiques).
- Són mecanitzables.

Desavantatges:

- Problemes d'absorció i difusió de la humitat.
- Sistemes d'alt rendiment bicomponents i amb necessitat de calor, almenys a l'etapa de post-curat.
- Problemes de temps de curat, vida de la mescla i necessitat de temperatura per aconseguir un alt grau de reticulació.

Els epòxids s'utilitzen en moltes aplicacions:

- Additius per a formigons.
- Adhesius estructurals per a la indústria aeronàutica.
- Fabricació de materials compostos.
- Recobriments superficials.
- Imprimacions.
- Electrònica

### **3.7.2.2. Adhesius reactius tenaços**

Els adhesius reactius tenaços presenten un excel·lent rendiment en aplicacions dinàmiques i quan les càrregues aplicades generen esforços de pelat i/o esquerdat. A més de les versions tenaces d'anaeròbics, ciano-acrilats i epòxids, podem parlar d'altres famílies adhesives pròpiament tenaces:

- Adhesius reactius tenaços per a substrats coincidents:
  - a) Anaeròbics tenaços.
  - b) Ciano-acrílics tenaços.
- Adhesius reactius tenaços amb capacitat intermèdia d'ompliment de forats:
  - c) Acrílics.
  - d) Adhesius de curat UV.
- Adhesius reactius tenaços amb capacitat d'ompliment de forats:
  - a) Epòxids tenaços.

Es centrarà en els acrílics i UV.

### **Acrílics**

Els adhesius acrílics modificats estructurals constitueixen la més recent i versàtil de les famílies d'adhesius emprades en l'assemblatge de peces en l'indústria. Aquests no necessiten que la mescla entre la resina i activador sigui completament homogènia ja que un cop generats els "centres actius", la propagació del polímer es produeix en el propi adhesiu. No es recomana l'ús de calor per accelerar el curat.

Els acrílics es presenten comercialment segons dos sistemes principals de mescla:

- Sistemes adhesiu més activador.
- Sistemes bicomponents.
- Sistemes bicomponents sense necessitat de mescla.

Tenen una excel·lent durabilitat (resistència a fatiga, a agents mediambientals, propagació de la ruptura, efecte de la folgança d'adhesió, disseny de la junta, etc.) comparat amb els adhesius estructurals més coneguts. Presenten a més, temps de manipulació molt curts.

Avantatges:

- Alta resistència a tallant, tracció i compressió.
- Moderada resistència a pelat.
- Resistència a temperatures de fins 150°C (algunes formulacions arriben gairebé a 200°C).
- Adhereixen quasi tots els substrats.
- Molt bona resistència química i hidrolítica.
- Preparació superficial mínima o innecessària.

Desavantatges:

- Adhesió pobre sobre la majoria dels elastòmers.
- Forta olor.
- En algunes ocasions, sistemes de mescla en proporcions diferents de 1:1.
- Punts d'inflamació baixos.

Les aplicacions dels acrílics són diverses gràcies al seu elevat rendiment en front a càrregues dinàmiques i a temperatures moderadament altes:

- Adhesió de ferrites a carcasses de motors elèctrics.
- Adhesió de sabates de frens a corones.
- Panells de calefacció solar.
- Equipament esportiu sotmès a tensions.
- Adhesió estructural en avions i embarcacions.

## **Adhesius de curat UV**

La polimerització reticulació induïda per la llum es començà a emprar fa més de 4000 anys en la preparació de mòmies, però no va ser fins al segle XIX quan es va tenir la idea d'emprar el mateix asfalt sensible a la llum com a material imatge per obtenir la primera fotografia permanent. Un adhesiu de curat UV conté una substància química denominada foto-iniciador.

Quan el foto-iniciador s'exposa a la llum UV reacciona per tal de generar radicals lliures. Els radicals lliures causen la polimerització dels monòmers al sistema adhesiu. Els sistemes adhesius de curat UV tenen sistemes secundaris de curat:

- Activadors químics.
- Sistemes de curat anaeròbic.
- Calor.
- Humitat.
- Oxigen atmosfèric.

Aquests sistemes de post-curat modifiquen les característiques físic-químiques de la junta adhesiva.

La primera limitació que tenen els adhesius UV és l'accés de la llum a la junta adhesiva. Això resulta senzill quan es pretenen unir substrats de vidre, ja que una de les parts serà permeable a la llum UV permetent el curat de l'adhesiu.

Si les parts són opaques la tecnologia es limita a processos d'adhesió, encapsulat, ompliment i recobriment. També és possible el curat de pel·lícules d'adhesiu exposant la junta adhesiva a la llum UV des d'un dels laterals de la unió adhesiva.

La velocitat de curat depèn de diversos factors:

- La intensitat i l'espectre de freqüències emeses per la font lluminosa.
- La formulació de l'adhesiu i l'espessor de la junta adhesiva.
- L'espessor, la composició química i el color de qualsevol vidre o polímer a través del qual ha de passar la llum transmesa cap a la junta adhesiva.
- El color i brillantor dels substrats.

Algunes avantatges dels adhesius de curat UV són les següents:

- Velocitats de curat elevades que permeten obtenir temps de manipulació curts.
- Capacitat d'ompliment de folgances.
- Adhesius tenaços amb propietats estructurals bones.
- Adhesions acceptables sobre polímers de baixa energia superficial.
- Bona resistència mediambiental.
- Aparença excel·lent.

Desavantatges:

- Adequat únicament per a substrats transparents a la llum UV.
- Es requereix una inversió important en equips.

Àrees d'aplicació:

- Fabricació de mobles.
- Electrònica (protecció encapsulat, recobriments, etc.).
- Aparells mèdics.

### **3.7.2.3. Adhesius reactius flexibles**

La funció primària d'un adhesiu elàstic és, generalment, el segellat. No obstant, molts adhesius elàstics s'empren en unions estructurals utilitzant suficient superfície per tal d'incrementar la rigidesa de la unió.

Tot i que existeixen més adhesius elàstics, els més importants són els següents:

- Silicones.
- Poliuretans.
- Silans modificats.

Els adhesius elàstics es troben comercialment com fluids més o menys viscosos que formen un cautxú elàstic mitjançant una reacció química.

Silicones, poliuretans i silans modificats es poden trobar en dos formats:

- Als sistemes monocomponents, l'adhesiu reacciona amb la humitat ambiental. El curat comença a la capa més exterior i continua cap a l'interior del cordó aplicat. Conforme es produeix la polimerització el cautxú es torna cada cop més impermeable a la humitat, dificultant la polimerització de les capes interiors.

Això limita la capacitat d'ompliment de folgança de l'adhesiu, que es troba entre els 6 i els 12mm, i la velocitat de curat, que normalment es troba al voltant a 1mm/dia com a mitjana. La velocitat de curat en profunditat és un procés controlat per la difusió, és a dir, depenent de la temperatura i la humitat. Els temps de formació de pell i el de tacte sec depenen de la velocitat de reacció, que és depenent del tipus d'adhesiu.

- Als sistemes bicomponents, l'adhesiu reacciona amb el segon component, el qual es sol afegir durant el procés de dosificació mitjançant boques mescladores. Els temps de curat són molt inferiors als dels seus monocomponents, per la qual cosa es solen emprar en línies de producció automatitzades.

## Silicones

La polimerització de les silicones dóna lloc a subproductes de reacció que generalment són volàtils. Normalment les silicones es classifiquen d'acord amb el subproducte que alliberen durant el procés de curat:

- Acètiques: quan alliberen àcid acètic. Generen problemes de corrosió sobre certs substrats metàl·lics com el coure.
- Alcoxi: alliberen alcohols de diferent pes molecular generalment metanol.
- Amíniques: alliberen amines<sup>38</sup>.
- Oxímiques: són formulacions especials que alliberen oximes, però amb la particularitat que aquest subproducte de reacció és reutilitzat novament a la reacció de polimerització. Per aquest motiu també s'anomenen silicones neutres.

---

<sup>38</sup> Amines: són compostos orgànics que contenen nitrogen com a element clau en el grup funcional amina. Són derivats de l'amoniac i resulten de la substitució dels hidrògens de la molècula pels radicals alquil. Segons siguin substituïts un, dos o tres hidrògens, les amines seran amines primàries, amines secundàries o amines terciàries, respectivament.

Existeixen a més silicones que curen sota radiació UV, mitjançant l'ús de foto-iniciadors en la composició. Normalment s'empren làmpades amb emissió UV per fixar el producte sobre els substrats. A vegades s'empra com sistema de curat dual amb el curat clàssic per humitat.

Les silicones, un cop curades, presenten les següents avantatges:

- Bona adhesivitat i segellat sobre una ampla varietat de substrats.
- Romanen flexibles entre  $-55^{\circ}\text{C}$  i  $250^{\circ}\text{C}$ , tot i que formulacions arriben a suportar fins a  $350^{\circ}\text{C}$  en pics.
- Bona durabilitat. Són resistents a la humitat, l'ozó i la radiació UV.
- Propietats dielèctriques destacades.

Algunes desavantatges:

- No es poden pintar.
- Les silicones acètiques produeixen una olor penetrant. No obstant, les silicones alcoxi i les oxímiques presenten olors suaus.
- En general baixa resistència a olis calents, combustibles i productes clorats. Es solen emprar en diverses aplicacions, com adhesius i segelladors industrials i en la construcció.
- Adhesió i segellat de components mecàniques i electròniques.
- Adhesió i segellat a la indústria de la refrigeració.
- Segellat i encapsulat d'elements elèctrics (silicones neutres).
- Recobriments de cintes transportadores.
- Adhesió i segellat d'aplicacions químiques.
- Segellat i juntes a la indústria de l'automoció.





Figura 84. Exemple de cinta adhesiva siliconada per la protecció del casc d'una embarcació.

Font: <http://www.nauticexpo.es>.

## Poliuretans

Els poliuretans són polímers bastos en la química del isocianat<sup>39</sup>. Sovint la denominació poliuretà és incorrecte, ja que només una petita fracció dels enllaços són grups uretans. Són el resultat de la reacció d'un isocianat amb aigua, o amb un polioli o una amina en el cas dels poliuretans bicomponents.

Els poliuretans monocomponents reaccionen amb la humitat atmosfèrica per generar un cautxú elastòmer. A l'igual que en el cas de les silicones, la reacció de polimerització succeeix des de l'exterior del cordó fins a l'interior, la qual cosa torna a limitar l'ample de cordó a més d'allargar els temps de curat. Pel contrari, els poliuretans bicomponents polimeritzen com a resultat de la reacció dels isocianats amb els corresponents poliols o amines a tota la massa de la junta adhesiva. Això elimina les limitacions de curat i permet velocitats superiors.

Els poliuretans mullen malament les superfícies, cosa que obliga a fer ús d'imprimacions basades en poliuretans diluïts i en silans, i que exerceixen la funció d'interfase entre l'adhesiu i el substrat. L'ús de l'imprimador a més incrementa enormement la vida de l'adhesió.

---

<sup>39</sup> Isocianats: els isocianats inorgànics són les sals de l'àcid isociànic HNCO, que contenen l'anió (NCO)<sup>-</sup>.

Els poliuretans presenten les següents avantatges:

- Segellen un ampli rang de substrats.
- Romanen flexibles entre -40°C i 80°C.
- Bona resistència als productes químics.
- L'adhesiu aplicat es pot pintar.
- Presenten una considerable resistència en verd abans del curat del producte. Això s'aprofita en aplicacions com el plegat de parabrises en vehicles.
- Produeixen olors.
- Presenten fenòmens d'histeresi que poden aprofitar-se en la amortiment de sorolls, vibracions, etc.

Desavantatges:

- Problemes de seguretat i higiene relacionats amb els isocianats, quan s'aplica calor sobre l'adhesiu sense polimeritzar. No obstant, els poliuretans, un cop curats, contenen concentracions extremadament baixes de isocianat sense reaccionar.
- Precisen imprimacions per a realitzar unions estructurals.
- Resistència pobre a la radiació UV.

Aplicacions:

- Construcció i reparació.
- Transport i automoció.
- Enginyeria mecànica i muntatge de màquines.
- Electromecànica.
- Construcció i reparació de remolcs.
- Construcció naval.
- Sistemes de ventilació.
- Electrodomèstics.

### **Silans modificats**

Els silans modificats van ser descoberts al Japó fa més de dues dècades. El seu ús com a segelladors i adhesius elàstics ha crescut de forma espectacular fins a arribar a consums de l'ordre de les silicones o els poliuretans.

Es basen en polièters acabats en grups siloxans<sup>40</sup>. La reacció de polimerització succeeix a través dels grups siloxans terminals iniciada per la humitat ambiental o l'addició de segon component. Com subproducte de reacció es genera metanol en baixa concentració, cosa que fa que l'olor disminueixi.

A diferència dels poliuretans, els silans modificats permeten incloure agents promotores de l'adhesió a la seva formulació. Això juntament amb la polaritat del polímer, permet una gran adhesió sobre els substrats molt variats, incloent polímers i vidre.

#### Avantatges:

- Bona adhesivitat i segellat sobre una ampla varietat de substrats, incloent l'amplia majoria dels polímers.
- Presenten viscositats baixes abans del curat, cosa que facilita la dosificació.
- Romanen flexibles entre els -40°C i els 100°C.
- Bona resistència als productes químics.
- Bona resistència a la radiació UV.
- L'adhesiu aplicat es pot pintar.
- Baix olor.

#### Desavantatges:

- Inhibeixen el curat dels poliuretans degut a que generen metanol durant el seu curat.

#### Aplicacions:

- Adhesió i segellat en la indústria de la construcció.
- Adhesió i segellat en la indústria del transport.
- Adhesió i segellat en la indústria de l'automoció.
- Fabricació de remolcs.
- Construcció de contenidors.
- Construcció de maquinària agrícola.

---

<sup>40</sup> Siloxans: grup de compostos que contenen silici, oxigen i hidrogen. Es polimeritzen amb facilitat donant silicones.

### 3.8. Comparativa de les propietats d'alguns adhesius

	Epòxid	Poliuretà	Acrílic Modificat	Ciano- Acrilat	Anaeròbic
<b>R l'impacte</b>	Pobre	Excel·lent	Bona	Pobre	Dolenta
<b>R tracció (Mpa)</b>	15,4	15,4	25,9	18,9	17,5
<b>R pelat en T (N/m)</b>	<5,25	14	5,25	<5,25	1,75
<b>Unió de substrats</b>	La majoria	No porosos	No porosos	No porosos	Metalls Act.
<b>T de servei (°C)</b>	(-55—120)	(-160—80)	(-70—120)	(-55—80)	(-55—150)
<b>Curat per calor</b>	Si	Si	No	No	No
<b>R a dissolvents</b>	Excel·lent	Bona	Bona	Bona	Excel·lent
<b>R a la humitat</b>	Excel·lent	Dolenta	Bona	Pobre	Bona
<b>OF (mm)</b>	0,15	3	0,75	0,25	0,6
<b>Olor</b>	Mig	Mig	Forta	Moderada	Mig
<b>Toxicitat</b>	Moderada	Moderada	Moderada	Baixa	Baixa

Figura 85. Comparativa de propietats d'alguns adhesius.

R: resistència.

OF: Ompliment de folgances.

Unitat (Mpa): Mega-Pascals.

Per tal de veure gràficament les diferències en quan a la resistència a l'impacte, la resistència a dissolvents i la resistència a la humitat dels diferents adhesius, s'ha elaborat la següent taula. Els valors que s'han pres per fer-la són:

- Pobre= 2.5
- Dolenta= 5
- Bona= 7.5
- Excel·lent= 10

	Epòxid	Poliuretà	Acrílic Modificat	Ciano-Acrilat	Anaeròbic
<b>R a l'impacte</b>	2,5	10	7,5	2,5	5
<b>R a dissolvents</b>	10	7,5	7,5	7,5	10
<b>R a la humitat</b>	10	5	7,5	2,5	7,5

Figura 86. Taula de valors per diferents resistències dels adhesius.

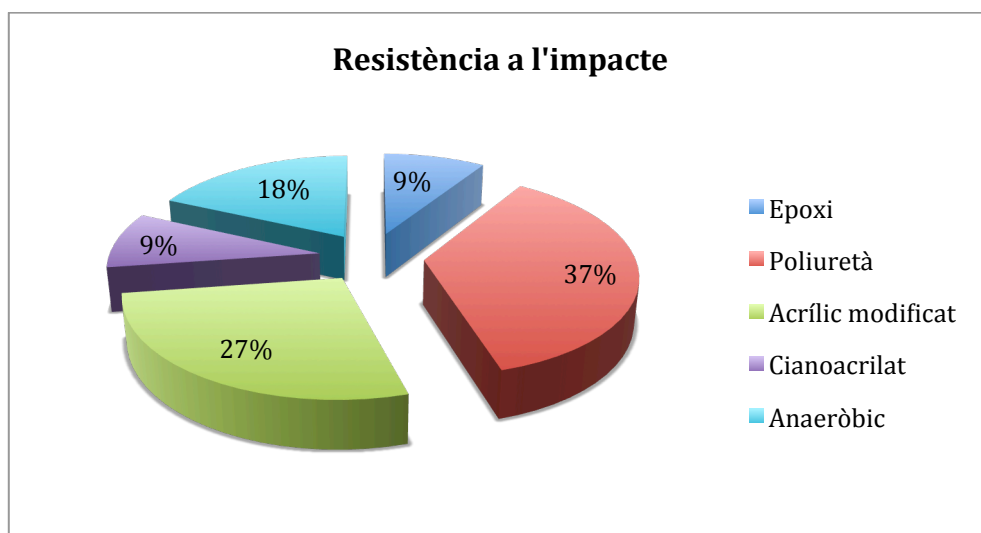


Figura 87. Resistència a l'impacte.

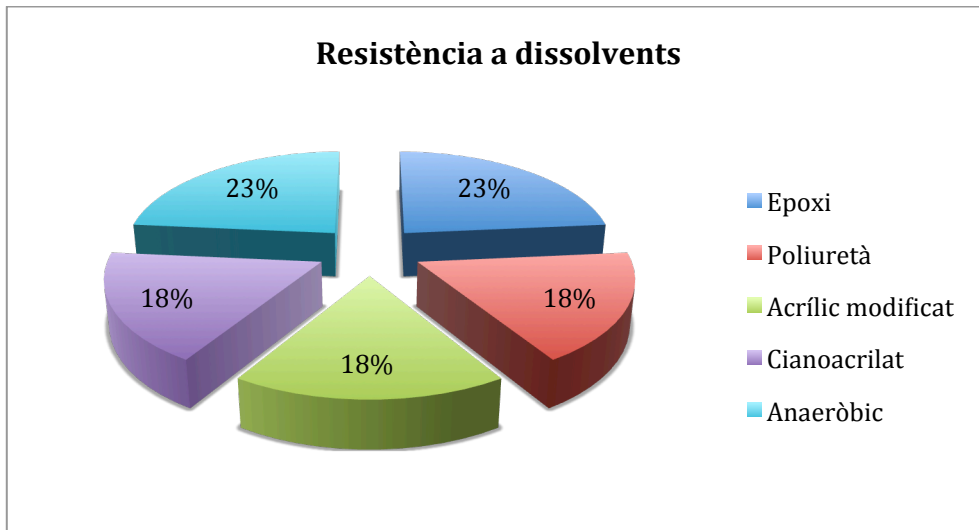


Figura 88. Resistència a dissolvents.

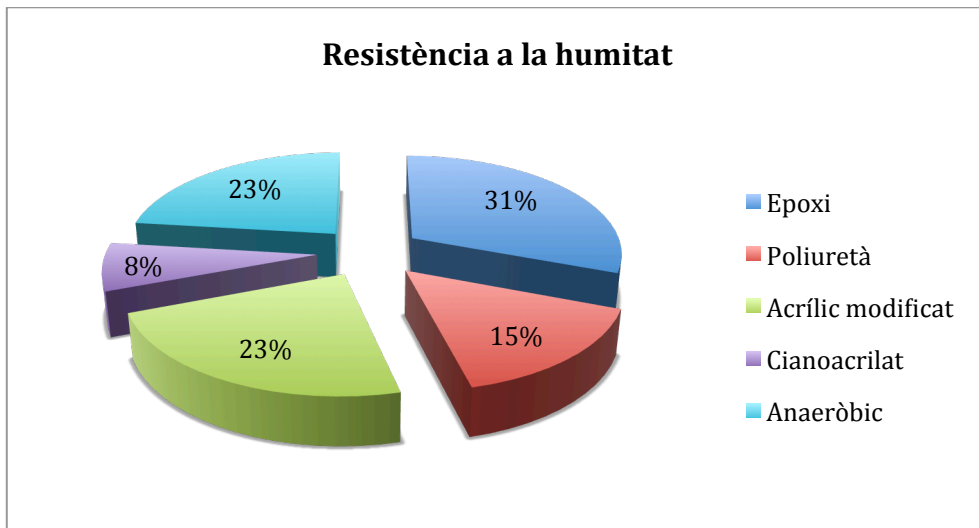


Figura 89. Resistència a la humitat.

### 3.9. Aplicacions en la construcció naval

Els adhesius estructurals es van començar a utilitzar en aquest camp cap a la dècada dels vuitanta, al Departament d'Arquitectura Naval i Enginyeria Oceànica de la universitat de Glasgow.

Una de les primeres aplicacions a gran escala va ser l'engraellat de fragates per l'Armada Britànica. Les drassanes tenien dificultats per controlar la distorsió induïda pel procés de soldadura en planxes de petit espessor al forro de cobertes. Les unions adhesives eren una possible solució als problemes de contracció i distorsió presents en aquest tipus d'estructures lleugeres.

Els adhesius ofereixen unions en importants aplicacions en parts significatives del disseny estructural i fabricació de diversos bucs i estructures offshore<sup>41</sup>. Obre possibilitats de construcció d'estructures sandvitx lleugeres i la combinació d'una ampla varietat de materials similars per tal d'aconseguir objectes de disseny específics. Tot i això és molt important que el dissenyador conegui perfectament les limitacions, avantatges i desavantatges de la unió adhesiva així com els de la pròpia unió adhesiva. D'aquesta manera és possible treure partit als avantatges i mirar de reduir o fins i tot eliminar els inconvenients.

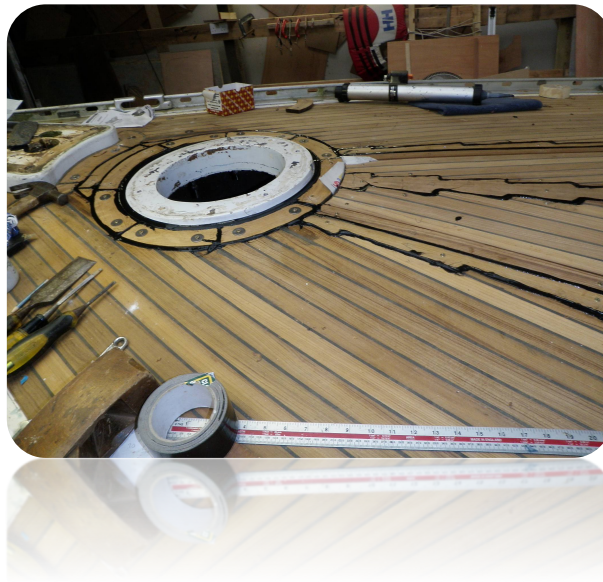


Figura 90. Exemple adhesiu elàstic utilitzat en la coberta d'una embarcació.  
Font: <http://www.boatdesign.net>.

---

<sup>41</sup> Offshore: fa referència a una estructura situada en el mar i que per tant està sotmesa a l'acció de les onades i a unes condicions meteorològiques adverses.

Els adhesius al igual que altres tècniques com la soldadura, que va necessitar més de 20 anys en ser acceptada dins del camp de les aplicacions navals, necessiten un temps similar per tal de ser completament acceptats en aquest àmbit juntament o alternativament amb la soldadura.

La introducció de materials compostos en la construcció naval va en augment al llarg temps aquest i és un dels motius pels quals es fa indispensable trobar nous mètodes d'unió.

El procés sandvitx és un dels més utilitzats a l'hora de construir cascos d'embarcacions esportives ja que proporciona un casc lleuger, molt rígid i robust. Les avantatges de construir embarcacions de fibra en front l'ús d'altres materials es troben a la fase de disseny del projecte, permetent l'obtenció d'un major espai i una reducció en el propi pes de l'embarcació.

Actualment són nombrosos els elements dels vaixells que van units al casc mitjançant adhesius i que alhora realitzen funcions de segellat. És una opció que està sent molt utilitzada actualment per diverses marques comercials.

Les cobertes d'embarcacions d'esbarjo contenen nombrosos accessoris que suporten esforços i es fa necessària la fixació sòlida i evitar el pas d'aigua a l'interior. Això es fa possible amb l'ús d'adhesius segelladors elàstics, ja que són capaços d'absorbir càrregues i formar una barrera impermeable al pas de qualsevol fluid.

Actualment existeixen nombroses composicions resistents a l'atac d'agents mediambientals i que permeten ser pintats sense patir atac químic. Algunes de les aplicacions són detallades a continuació.



### **3.9.1. Calafatejat de cobertes de fusta**

Són varies les operacions pel calafatejat<sup>42</sup> de cobertes:

- Igualació de juntes
- Neteja de la coberta
- Imprimació de la fusta
- Col·locació del fons de junta
- Aplicació de l'adhesiu
- Llimat de la coberta
- Acabat
- Manteniment de la coberta

#### **3.9.1.1. Igualació de juntes**

És fonamental que l'amplada de la junta sigui concorde amb l'amplada dels reblons de fusta.

#### **3.9.1.2. Neteja de la coberta**

Cal fer una bona preparació dels substrats per tal d'aconseguir una perfecta adhesió a l'interior de la junta.

La junta ha d'estar seca i neta abans de l'aplicació. No s'aconsella l'ús d'aire comprimit per a la neteja ja que hi ha perill de desprendre oli que pot ser absorbit per la fusta. La zona d'adhesió cal que estigui desengreixada, no es recomana l'ús de desengreixats sobre materials porosos, és per això que s'aconsella l'ús de paper de cel·lulosa xopat en un netejador industrial. Cal anar reposant el paper per evitar que es dipositi brutícia sobre la junta.

#### **3.9.1.3. Imprimació de la fusta**

La imprimació comença a l'acabar les operacions de neteja i desengreixat de la fusta de la coberta. La imprimació s'aplicarà amb un pinzell en una única capa dels flancs de la coberta (zona d'adherència de l'adhesiu).

---

<sup>42</sup> Calafatejat: acció d'introduir entre dues taules del casc de fusta una combinació d'estopa de cànem embeguda en brea a fi d'evitar l'entrada d'aigua. L'estopa de cànem és un dels noms que reben les varietats de la planta 'cànnabis sativa' i el nom de la fibra que s'obté d'elles.

S'ha d'assegurar que la imprimació cobreixi tota la zona d'adhesió. S'ha de protegir les zones imprimades de la pols i la humitat durant l'assecat del producte abans de començar el calafatejat. El temps màxim per aplicar l'adhesiu és de 24 hores.

#### **3.9.1.4. Col·locació del fons de junta**

L'adhesiu de segellat ha d'absorbir els moviments de contracció i expansió de la fusta és per això que el producte ha d'enganxar només en els flancs de la junta, mai al fons.

Per aquest motiu es col·loca en el fons una cinta que impedeix que el producte s'enganxi al fons.

#### **3.9.1.5. Aplicació de l'adhesiu**

Quan la imprimació està seca i el fons de junta està col·locat es comença a aplicar l'adhesiu sobre la junta. Per a resultats òptims cal evitar les oclusions d'aire recolzant la punta de la boca de l'aplicador contra la junta i col·locant la pistola de forma vertical.

Cal assegurar que:

- La temperatura de la fusta sigui inferior als 25°C.
- La temperatura ambient sigui constant durant l'aplicació o bé descendent i estar compresa entre els 5°C i els 25°C.
- La humitat de la fusta no sigui superior a un 15%.

Cal protegir la junta de la pluja i llum solar durant 8 hores. L'adhesiu estarà curant durant 4 o 7 dies.

#### **3.9.1.6. Llimat de la coberta**

Un cop han transcorregut els 7 dies, l'excés de material es retalla i posteriorment es lima la coberta. Cal evitar arrencar l'adhesiu de les bores de la junta.

### 3.9.1.7. Acabat

Sovint s'envernissa la coberta després del calafatejat. Cal anar en compte amb algunes laques i vernissos que poden danyar l'adhesiu i retarda el curat. Cal comprovar la compatibilitat amb l'adhesiu. Per a resultats òptims en el envernissat cal curar l'adhesiu almenys un mes.

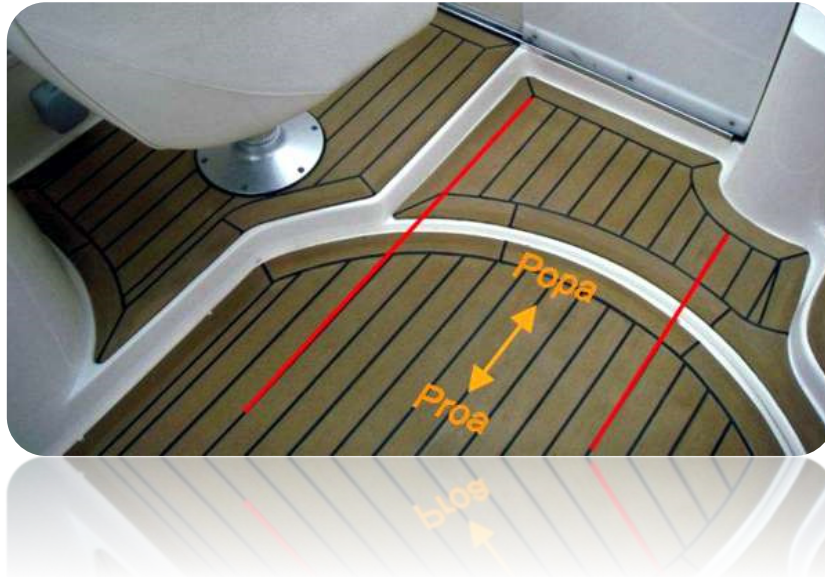


Figura 91. Calafatejat de cobertes de fusta.

Font: <http://www.hireoffices.com>.

### 3.9.1.8. Manteniment de la coberta

És important netejar i rentar la coberta de forma regular per evitar que es sequi. Observacions referents al dimensionat de les juntes i retracció del producte :

El correcte dimensionament de les juntes entre els llistons de fusta és fonamental dintre del procés de calafatejat de cobertes.

Tot i que l'adhesiu aplicat sigui elàstic, no suportarà una contracció excessiva de la fusta si no té l'ample suficient per deformar-se.

Per altra banda cal evitar que el producte s'adhereixi sobre el fons de la junta, ja que en cas de deformació de la fusta pot donar lloc a ruptures i que es desenganxi la junta.

Per aquesta raó es convenient col·locar en el fons de la junta una cinta base de polietilè que eviti l'adhesió de l'adhesiu. D'aquesta manera s'obté una major capacitat de deformació i permet que la contracció del producte s'efectuï per l'interior i per l'exterior.

És important no confondre una retracció de l'adhesiu amb una retracció de la fusta per absència d'humitat. Freqüentment es pot observar una junta contreta després d'1 any de que s'hagi aplicat l'adhesiu.

### 3.9.2. Enganxat de panells prefabricats de fusta a l'estructura de la coberta

Sovint, en molts tipus d'embarcacions la coberta de fusta és construïda amb panells prefabricats col·locats sobre l'estructura de la coberta cosa que provoca una reducció de costos. Es pot destacar l'ús de llistons de teca disponibles en qualsevol mida o panells de teca amb juntes de goma i sense reforç de contraxapat.



Figura 92. Enganxat de llistons de teca sobre la coberta d'una embarcació.

Font: <http://www.hireoffices.com>.

Els adhesius elàstics i els poliuretans monocomponents són ideals per a l'enganxat d'aquests panells a la coberta. Són fàcils d'utilitzar, són resistent a l'aigua salina, posseeixen propietats auto-anivellant en funció de la necessitat i no són necessàries fixacions mecàniques addicionals. L'adhesiu resultant és extremadament fort, elàstic i impermeable.

### 3.9.3. Enganxat d'elements antilliscants en coberta

La coberta revestida amb resines sintètiques proporciona característiques com superfícies antilliscants, protecció contra el deteriorament, estanquitat, etc.

La utilització d'adhesius de poliuretà monocomponents augmenta l'efectivitat d'aquestes funcions.

Revestiments més coneguts:

- TBS.
- Norament.
- Antislid.
- Polygrip.
- LayTech.
- Nautoflex.

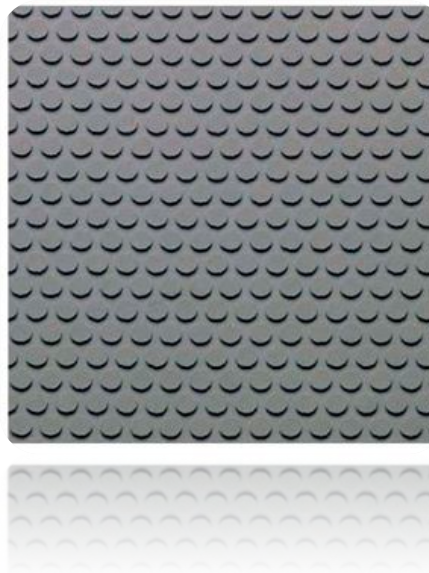


Figura 93. Exemple revestiment antilliscant.

Font: <http://www.nauticexpo.es>.

#### **3.9.4. Enganxat al casc de la coberta**

La fixació de la coberta d'un vaixell al seu casc és una de les aplicacions més crítiques i complicada en la indústria de les embarcacions d'esbarjo.

És vital assegurar una estanquitat total. Alhora, la rigidesa dels cascos està condicionada pel comportament de la zona perimetral d'unió del casc amb la coberta.

Una unió amb segellat i enganxat elàstic és la solució perfecta per aquesta aplicació, ja que combina la resistència mecànica d'un adhesiu amb les propietats d'estanqueïtat d'un segellador.

Els sistemes mecànics tradicionals d'unió no ofereixen una protecció efectiva en front a les filtracions, mentre que els adhesius rígids es deterioren amb els anys i són susceptibles d'una fallada d'unió.

Tot i que els sistemes d'enganxat elàstic estan especialment indicats per a cascos i cobertes de GRP (Polièster), també es poden fer servir per a vaixells fabricats en alumini i acer. Poden ser enganxats amb èxit fins i tot cascos i cobertes fabricats amb materials diferents.

Els adhesius actuals tenen una resistència duradora al contacte amb l'aigua salada, una elevada absorció d'impactes i una gran capacitat per a suportar les elevades forces de torsió que actuen en el casc durant la navegació.

Aquests adhesius també posseeixen bones propietats com massilla d'ompliment per tal de compensar les amplies toleràncies de les peces modelades tant de plàstic com de metall. A més, la resistència a esforços de tracció i cisallament és suficient per tal de formar una unió estructural forta, eliminant la necessitat dels treballs lents de laminació posteriors a l'aplicació de l'adhesiu.

Depenent de la mida i tipus de vaixell els fabricants han dissenyat diferents mètodes al llarg del temps, però l'objectiu sempre ha estat el mateix:

- Obtenir una línia d'unió satisfactòria entre el casc i la coberta amb l'ús de les mínimes subjeccions addicionals (cargols, reblats, etc.).
- Estalviar mà d'obra
- Elimina el risc de filtracions a la coberta.

La tècnica inicialment utilitzada pels constructors de vaixells es coneix popularment com el mètode de "la caixa de sabates", degut a que la coberta encaixa sobre el casc com la tapa d'una caixa de sabates.

Aquesta tècnica, que assegura que l'aigua no es pot acumular sobre la línia d'unió. És principalment utilitzada en motors, sent l'adhesiu normalment aplicat després de que les dues parts hagin estat assembleades en sec.

Un exemple pràctic i dels primers que van aparèixer, el trobem en la fabricació de vaixells monocasc per les drassanes franceses. Amb la finalitat d'incorporar una barana en el perímetre de la coberta i de proporcionar una unió suficientment forta com per resistir les elevades forces originades pel vent sobre els punts d'ancoratge de les veles, es va dissenyar una unió entre el casc i la coberta utilitzant adhesius.

La coberta era completament plana, mentre que el casc incorporava un suport continu sobre el qual descansaven les moltures de la coberta. A la pràctica, la majoria dels constructors incorporen un canal en forma de 'U' a la cantonada superior i d'una profunditat ajustada a l'amplada del cordó de l'adhesiu comprimit. Per tant, els espaiadors no són necessaris ja que la geometria final del cordó està condicionada pel pes de la coberta i la profunditat del canal. No obstant, el cordó necessita el suficient espessor i amplada per tal de resistir elevades forces de pelat que apareixen durant la navegació.

Existeix també el problema afegit que el contacte de l'adhesiu amb l'aire es troba limitat per estar comprimit dins del canal en forma de U. Això significa que el procés normal de curat per reacció amb la humitat ambient es veu retardada. Per tal de solucionar aquest problema s'aplica un accelerador a l'adhesiu.

L'adhesiu s'aplica mitjançant sistemes de bombeig mòbils que circulen al voltant del perímetre del casc formant un cordó d'adhesiu continu. La coberta es col·loca posteriorment sobre l'adhesiu per formar la unió.

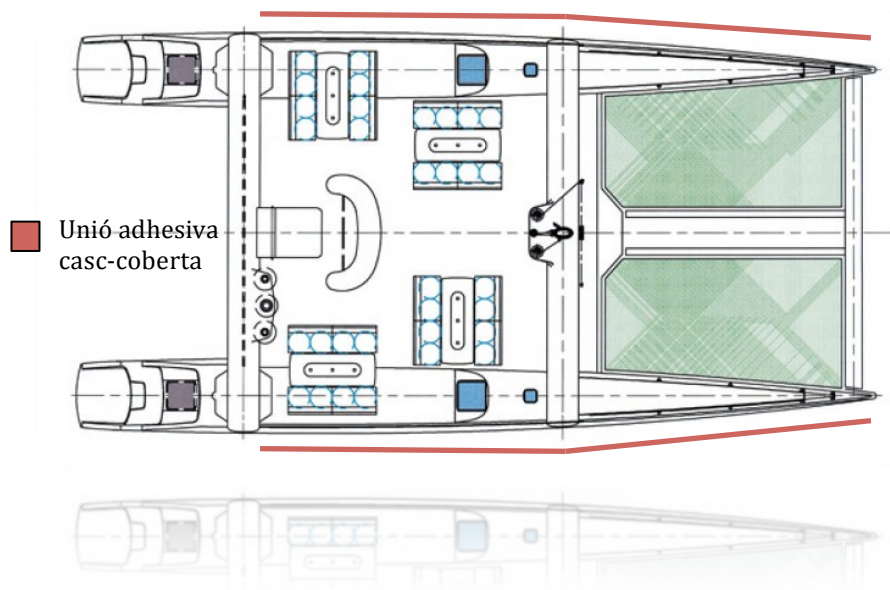


Figura 94. Catamarà Tahiti 60.

Font: <http://www.sailconnections.com>.

Aquesta tècnica d'unió va prendre un avenç tecnològic important amb Fountaine Pajot, un constructor francès de grans catamarans. Degut a que el casc del catamarà roman horitzontal sobre l'aigua inclús durant la navegació, les forces que actuen durant els ancoratges de les veles són molt menors que en els monocascos. Per aquesta raó Fountaine Pajot va decidir construir el model de catamarà "Tahiti", amb una unió entre el casc i la coberta exclusivament adhesiva. Va prescindir completament de les unions amb cargols.

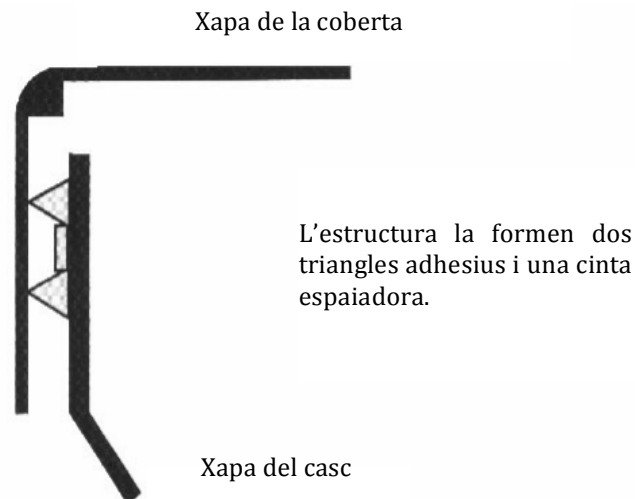


Figura 95. Segellament de juntes.  
Font pròpia.

En la construcció de bots salvavides de PRFV<sup>43</sup> i alumini està estandarditzat unir la coberta i el casc utilitzant adhesius de poliuretà monocomponents, cosa que fa que existeixi un enganxat elàstic bastant tenaç i que requereix fixacions mecàniques mínimes.

La tecnologia de l'adhesiu ofereix un nombre significatiu d'avantatges per aquest tipus d'aplicació. Entre d'altres, elimina la necessitat de realitzar treballs de laminació sobre el polièster gracies a les propietats consistents per omplir forats i les capes d'adhesiu absorbeixen esforços de torsió i cops, així com també segellen juntes a través de les que poden entrar aigua.

### 3.9.5. Segellats perimetrals en portes i braçoles, i enganxat de mampares lleugeres al casc

La col·locació de mampares lleugeres de fusta no estructural al casc PRFV, acer o alumini és particularment fàcil de realitzar amb adhesius elàstics de poliuretà.

La fixació de blocs utilitzats per col·locar i assegurar la mampara es realitza mitjançant l'enganxat d'aquests sobre el casc. Elimina la necessitat de treballs addicionals de laminació del casc de PRFV o la soldadura de cartel·les en els cascos de metall. Les juntes adhesives absorbeixen esforços de torsió.

<sup>43</sup> PRFV: Plàstic Reforçat amb Fibra de Vidre (P.R.F.V.). És un material compost, constituït per una estructura resistent de fibra de vidre i un material plàstic que actua com a aglomerant. El reforç de fibra de vidre, proveeix al compost resistència mecànica, estabilitat dimensional i resistència a la calor. La resina plàstica aporta resistència química dielèctrica i comportament a la intempèrie.



### 3.9.6. Enganxat de protectors de cautxú al casc

Els protectors de cautxú són dissenyats per protegir el casc d'embarcacions dels agents nocius. Actuen com a amortidors que absorbeixen impactes i rascades. Quan aquests són més elàstics, millor poden realitzar la seva funció.

El seu comportament elàstic varia d'acord al tipus de material utilitzat. L'acció d'absorció de cops del protector de cautxú és millor amb la utilització en les juntes d'adhesius elàstics.

Els protectors de cautxú en fusta convencional, PVC<sup>44</sup> o fabricacions de poliuretà poden enganxar-se utilitzant adhesius elàstics. Les juntes elàstiques ajuden a absorbir esforços de tallant i tracció, sobre tot quan l'embarcació entra al moll.

En cas de que els protectors de cautxú estiguin subjectes amb cargols o dispositius similars es pot realitzar un segellat de la unió amb un segellador elàstic altament adhesiu de poliuretà. S'utilitza per absorbir esforços de torsió, segellar els forats dels cargols i preveu que no entri aigua o brutícia a través del protector de cautxú.

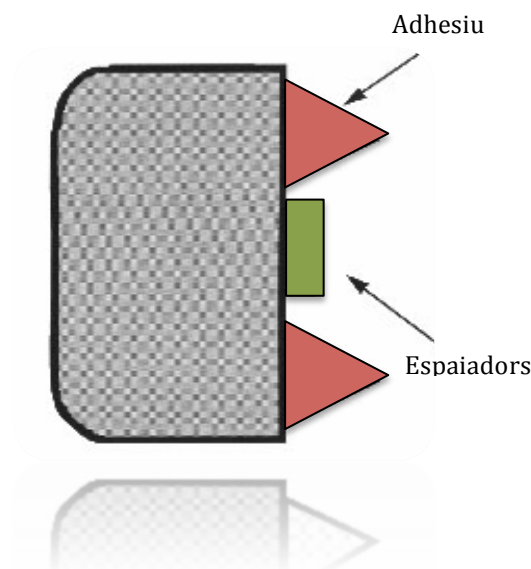


Figura 96. Protector de cautxú sobre fusta massissa.

Font pròpia.

<sup>44</sup> PVC: policlorur de vinil. És el material més versàtil de la família dels plàstics, doncs a més de ser termoplàstic, a partir d'ell es poden obtenir productes rígids i flexibles. A partir de processos de polimerització, s'obtenen compostos en forma de pols, plastisols, solucions i emulsions.

### 3.9.7. Segellats entre la quilla i el casc

La junta entre la quilla i el casc està sotmesa a alts esforços, particularment quan un vaixell està navegant o quan realitza un viatge. Aquesta junta crítica hauria d'estar dissenyada i realitzada amb molta cura per tal de suportar aquests esforços.

La junta és particularment propensa a fuites d'aigua, cosa que fa que es presentin restes de floridura i taquin la quilla quan el vaixell és arrossegat al dic. Per aquesta aplicació és important l'ús d'un adhesiu/segellador de poliuretà altament adhesiu d'alta duresa.

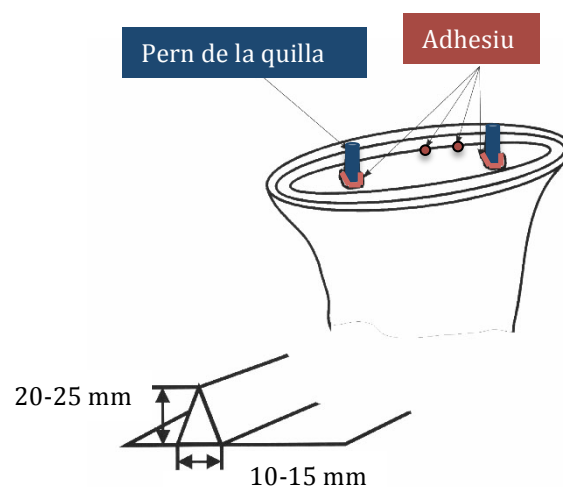


Figura 97. Segellat entre els pern de la quilla i el casc.

Font pròpia.

### 3.9.8. Enganxat i segellat de farratges i fixacions

Les farratges i fixacions de cobertes de tot tipus necessiten estar fixats de tal manera que les juntes quedin estanques. Algunes d'aquestes fixacions en ocasions estan suportant forces molt elevades i esforços de torsió.

Segellats pobres en juntes poden causar danys seriosos com la corrosió del metall, descomposició de la fibra de vidre i fuites d'aigua causants de danys en l'acabat interior.

Enganxat i segellat de fixacions sotmeses a alts esforços mecànics:

- Les fixacions de la coberta com poden ser els rails del foc i de la gènova, cabries i les guies tenen que absorbir grans esforços dinàmics.

- L'adhesiu elàstic estructural és el producte ideal per a l'enganxat i segellat d'aquestes fixacions.

Fixacions segellades sotmeses a esforços mecànics mínims:

- Fixacions en cobertes com poden ser ventiladors, forats per guardar els suports del trinquet etc. necessiten ser segellades per evitar l'entrada d'aigua, però no suporten grans esforços tensionals.
- Aquestes fixacions poden ser segellades amb eficàcia utilitzant un adhesiu segellador comú.

És de vital importància assegurar que l'adhesiu no és expulsat completament quan es forcen els cargols. Per aquest motiu es col·loquen volanderes d'1mm d'espessor perquè actuïn com espaiadors.

### **3.9.9. Enganxat de llistons i elements de fusta (escales de cabines, seients, escales principals)**

En embarcacions i creuers de plaer així com en vaixells transoceànics, les escales principals, escales de cabines i passamans estan fabricats freqüentment amb fustes tropicals, escollides per la seva durabilitat i bon acabat.

La utilització per a la seva fixació pot perjudicar amb el temps dita durabilitat i acabat, degut a l'aparició d'humitat a través dels forats dels cargols. Per aquesta raó és recomanable fixar llistons o elements de fusta mitjançant adhesius.

L'absència de forats de cargols preveu que l'aigua actuï fent malbé la fusta. Això és important sobretot en la construcció d'escales principals.

Al mateix temps l'enganxat utilitzant adhesius elàstics ofereix altres avantatges. La capa d'adhesiu ajuda a l'absorció de sorolls i trepitjades i amorteix les vibracions. La major part de les superfícies pintades poden conservar-se sense pèrdua de protecció anticorrosiva. I els efectes potencialment nocius de la penetració d'humitat a l'interior del polièster són eliminats.

Petits vaixells com poden ser canoes, vaixells a pedal, etc. tenen algunes juntes que poden ser segellades permanentment amb l'ajuda de la tecnologia de l'enganxat elàstic. D'aquesta manera s'eviten danys mecànics de components i unions.

L'enganxat amb adhesius elàstics és particularment avantatjós quan les juntes a unir estan formades per materials de diferent naturalesa, per exemple enganxat de seients lliscants d'alumini a PRFV, seients de fusta a alumini o PRFV.

L'ús d'adhesius elàstics permet als fabricants de vaixells estalviar-se temps i operacions laborioses com la laminació de la fibra de vidre o el segellat un a un de les fixacions cargolades.

### 3.9.10. Enganxat de cristalls

La major part de les construccions amb cristalls utilitzats en la indústria naval són alhora classificats com làmines acríliques (PMMA o polymethyl metacrilato), àmpliament comercialitzat sota noms com "Perspex" i "Plexiglas", o policarbonat (PC), comercialitzat com "Makrolon". Menys comú però també utilitzats, són els realitzats de poliestirè (PS), que és recomanat sota el nom de "Metzoplasts".

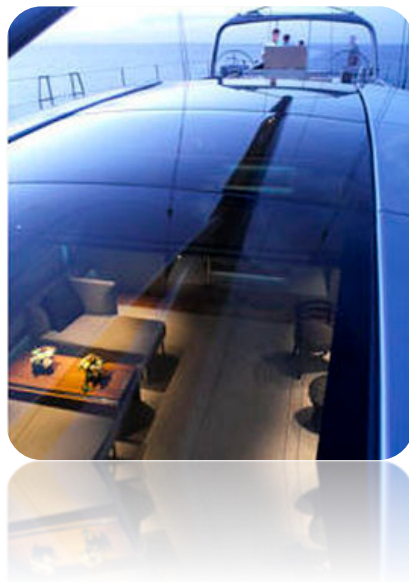


Figura 98. Panells de vidre FORMGLASS SPEZIAL®.

Font: <http://www.nauticexpo.es>.

Totes les construccions amb cristall posseeixen certes característiques que calen ser conegudes abans de ser instal·lats o enganxats amb adhesius, ja que si són col·locats incorrectament són propensos a ruptures degudes als esforços als que estan sotmesos i que es poden agreujar com a conseqüència de l'ús d'adhesius de base poliuretà.

Les construccions anteriors posseeixen més alt coeficient de dilatació tèrmica que els cristalls convencionals.

Com a conseqüència d'això, quan dissenyem una instal·lació amb cristall, cal incorporar una junta d'expansió de almenys 5mm, entre el rebaix de la finestra i el panell de metacrilat per tal d'absorbir els moviments tèrmics. De la mateixa manera, els forats per a la fixació de cargols calen ser omplerts en la seva totalitat, és a dir, per sobre del diàmetre del cargol.

Per reduir al mínim els riscos de ruptura per tensió, les làmines construïdes amb cristall haurien de ser instal·lades completament planes. No haurien d'estar en tensió com a conseqüència d'una determinada curvatura pel fet d'utilitzar fixacions mecàniques. Quan el disseny especifica una certa curvatura, els panells haurien de ser abastits per un proveïdor especialitzat i així assegurar una instal·lació sense estar sotmesa a esforços.

## 4. TÈCNIQUES D'UNIÓ HÍBRIDES

Fins ara s'han analitzat diferents tècniques d'unió per separat, però també existeix la possibilitat de combinar dues o més tècniques d'unió per tal de produir juntes amb propietats addicionals que no es poden obtenir amb la utilització d'una sola tècnica.

Sota aquesta definició s'agrupen diverses tècniques amb el títol d'unions híbrides, algunes ja totalment emprades, d'altres emergents o bé en fase d'estudi i desenvolupament.

Els tipus més comuns són aquells que impliquen unió adhesiva combinada amb reblats o clenxats o bé punts de soldadura. Les tècniques que s'estudiaran són:

- Weldbonding.
- Unió mecànica combinada amb unió adhesiva.
- Unió Arc/Làser.
- Unió soldadura MIG/Plasma.

### 4.1. Unió Weldbonding

#### 4.1.1. Fonament

El weldbonding és una combinació de la soldadura per resistència per punts i la unió adhesiva. Normalment, s'aplica una pasta adhesiva a una de les xapes i després es tanca la junta amb l'altre xapa per, posteriorment, efectuar un punt de soldadura a través de les dues xapes i de la capa d'adhesiu. L'esforç entre elèctrodes desplaça l'adhesiu obtenint contacte elèctric entre les xapes i efectuant una soldadura de manera normal. Com el calor de la soldadura es troba molt localitzat el dany que es produeix a l'adhesiu és molt petit.

Finalment, l'adhesiu es cura per tal de completar l'assemblatge. Les pastes adhesives de curat per calor són emprades perquè són estables i tenen una viscositat consistent a temperatura ambient. Generalment, aquests adhesius es curen a un forn a 180°C durant uns 30 minuts.

#### 4.1.2. Consideracions de procés

Quan es solda per punts xapes d'un material a través d'un adhesiu (o segellador), és important que l'adhesiu sigui desplaçat de forma consistent de la interfase sota la influència de l'esforç entre elèctrodes.

La presència de l'adhesiu pot proporcionar una major resistència elèctrica a la interfase i provoca la creació de més calor en la soldadura. Això pot provocar risc de projeccions i variabilitat en la qualitat de les soldadures.

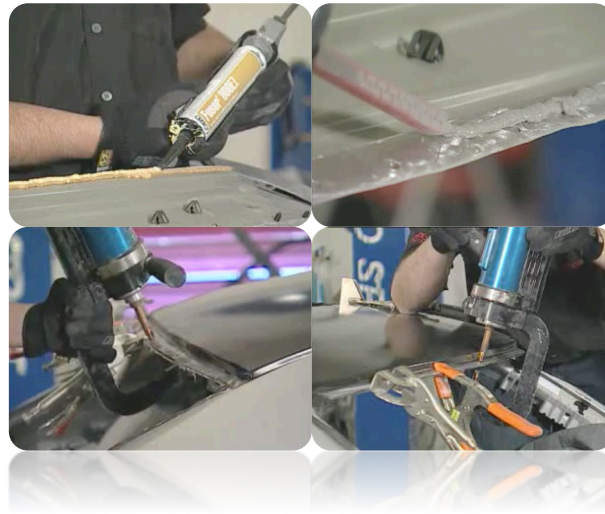


Figura 99. Unió híbrida weldbonding.

Font: [www.searchautoparts.com](http://www.searchautoparts.com).

La pasta adhesiva hauria de tenir una viscositat suficientment baixa per tal de permetre el seu desplaçament sota l'acció dels elèctrodes però no hauria de desbordar de la junta per complet abans de procedir al curat de l'adhesiu ja que això podria causar problemes a la soldadura. En alguns casos, l'adhesiu a la cantonada pot reaccionar a l'acció dels elèctrodes i reduir l'eficàcia de l'esforç aplicat entre les superfícies metàl·liques. Com a conseqüència, és preferible un major esforç per tal de compensar aquest fenomen i millorar així el desplaçament local de l'adhesiu.

L'adhesiu adherit als caps pot curar i generar una elevada resistència de contacte entre elèctrode i peça que pot conduir a projeccions i rebaves, causant així danys en els caps i en component.

#### 4.1.3. Avantatges i inconvenients

Les principals avantatges que proporciona la soldadura per resistència (unió discontinua) són la rapidesa i la facilitat d'automatització, un elevat nivell de control de qualitat i una major resistència de la unió en front a càrregues d'impacte. El principal inconvenient d'aquest mètode és la nul·la capacitat de segellat en front a líquids i gasos.

Per la seva part, la unió adhesiva (unió contínua) presenta com avantatges l'absència de concentració de tensions, millor comportament en front a fenòmens de fatiga, proporciona un bon segellat de la junta i provoca un dany mínim o inexistent als substrats. Però aquesta tècnica d'unió té com a inconvenient la susceptibilitat al dany per impacte i la necessitat d'una preparació superficial dels substrats prèvia a l'aplicació de l'adhesiu.

Principalment, el que s'aconsegueix emprant aquesta tècnica híbrida és una millora de la resistència, tant estàtica com dinàmica, una millor segellat i un millor comportament de la unió davant fenòmens vibratoris. A més, les unions híbrides obtingudes mitjançant weldbonding presenten un bon comportament en front a impactes.

El principal inconvenient que presenta és la lentitud del procés degut a la necessitat d'un tractament superficial adequat als substrats i a l'aplicació i curat de l'adhesiu. A més, existeix una falta d'informació en referència als modes de fallada i durabilitat de les unions realitzades mitjançant weldbonding.

#### **4.1.4. Aplicacions**

És comú soldar a través d'adhesius i segelladors en vehicles en els quals la base és l'acer però, a la majoria d'ells, no és l'adhesiu el que aporta la resistència estructural. Els adhesius només s'empren per tal d'incrementar la rigidesa de seccions en determinades àrees d'estructures d'acer.

S'han desenvolupat molts estudis sobre la tècnica de weldbonding amb aliatges d'alumini i les seves principals aplicacions han tingut lloc en prototips i vehicles experimentals. Quan la soldadura en producció sigui controlada adequadament, s'aconseguiran resultats fiables.

No obstant, existeix certa resistència a una major utilització de la soldadura per punts en aliatges d'alumini, per aspectes que afecten a la fiabilitat. A més, l'equip de soldadura requerit és molt més gran que el requerit per acer ja que es necessiten majors esforços i majors corrents de soldadura.

#### **4.1.5. Equips**

Els equips utilitzats per a la realització de les unions híbrides aquí descrites són exactament els mateixos que els emprats a cada tècnica de les que componen el procés híbrid per separat.



A continuació es presenta un resum general dels equips utilitzats.

Equips emprats en les tècniques híbrides		
Soldadura per punt/Ancoratge mecànic		Adhesiu
<b>Weldbonding</b>	Màquina de soldadura per punts	
<b>Rivbonding<sup>45</sup></b>	Màquina de reblat	Sistema de dosificació Forn de curat
<b>Clinchbonding<sup>46</sup></b>	Màquina de clenxat	

Figura 100. Equips emprats en tècniques d'unió híbrides.

#### 4.1.6. Adhesius

Els adhesius utilitzats per a la realització de les tècniques híbrides depenen dels requeriments de cada aplicació concreta. En alguns casos, són preferibles adhesius de base elàstica en front als epòxids degut als problemes de seguretat i salut que comporta la resina sense curar.

Els adhesius d'aplicació en calent que són semi-sòlids a temperatura ambient presenten una major resistència a ser eliminats fora de la junta durant el pretractament anterior al pintat i curat. Una limitació dels adhesius és el fenomen d'envelliment per exposició a l'ambient i que implica la reducció de la resistència i la deformació de la peça. L'extensió de la pèrdua en resistència depèn de la superfície del material en particular, del tipus d'adhesiu i de les condicions d'envelliment. Amb l'envelliment, també es pot produir una lleugera reducció en el comportament a fatiga.

<sup>45</sup> Rivbonding: és una tècnica d'unió híbrida que combina la tècnica d'unió de reblat amb la tècnica d'unió adhesiva.

<sup>46</sup> Clinching: mètode simple per unir dos o més xapes metàl·liques entre si, tals com soleres, muntants, etc. És un procés on les parts s'uneixen per deformació plàstica en fred. La unió es genera quan la pressió que exerceix el punxó dins de la matriu aconsegueix un valor determinat, fent que una part del material flueixi lateralment formant la traba d'unió amb la xapa de sota.

#### **4.1.7. Pretractament**

Els aliatges d'alumini requereixen un pretractament superficial per a una major durabilitat de l'adhesiu. En general, els millors tractaments per a la durabilitat creen una superfície altament resistent, la qual és menys adequada per a la soldadura per punts posterior. En aquest cas, es recomana modificar les condicions de soldadura per tal que incorporin un pols de preescalfament de baixa intensitat i un cicle de corrent per impulsos.

El preescalfament proporciona una ruptura controlada de la interfase resistent i un flux uniforme de corrent. Amb un únic pols la corrent es centra en uns pocs punts de contacte en els que la densitat d'energia és tan elevada que es genera una calor local intensa, provocant així l'aparició de projeccions.

### **4.2. Unió Mecànica combinada amb Unió Adhesiva**

#### **4.2.1. Fonament**

Els reblats auto perforants es poden fixar o col·locar a través d'adhesiu prefixat entre les xapes a unir donant lloc al rivbonding. El procés comença fixant les xapes entre un punxó i una matriu. El reblat semi-tubular s'introdueix en els materials a unir entre el punxó i la matriu. Perfora la xapa superior i la forma de la matriu fa que el reblat s'obri dins la xapa inferior per tal de formar un ancoratge mecànic. La forma de la matriu també provoca la formació d'un botó per sota de la xapa inferior.

Idealment, la cua del reblat no ha de perforar la xapa inferior. La pasta adhesiva és desallotjada de la junta però una part de l'adhesiu sempre queda retingut al botó entre les xapes.

La unió combinada d'adhesiu i clenxat, clinchbonding, es duu a terme de la mateixa manera amb la diferència de que ara el reblat es substitueix per una profunda pressió a la part superior. Per la part inferior la matriu forma un ancoratge mecànic en forma de botó.

Tant l'ús de reblats de cap presoner com de cargols requereix que s'obrin forats previs a ambdues xapes, cosa que implica que l'adhesiu no pugui ser contingut completament. Existeix l'alternativa dels cargols que no necessiten perforat previ ja que el seu propi flux forma un forat.

#### 4.2.2. Consideracions de procés

Els elevats esforços associats amb els processos de reblat o clenxat (solen ser 10 cops majors que els emprats habitualment en la soldadura per punts) eliminen la possibilitat de qualsevol problema vinculat al desplaçament de l'adhesiu.

Com que l'àrea de l'eina utilitzada per aquests processos sol ser major que la de l'elèctrode de soldadura per punts, l'àrea de la que s'elimina l'adhesiu és major. Els paràmetres de procés s'han de fixar de tal manera que s'eviti esquerdes de la làmina inferior i la consegüent contaminació de la matriu.

S'ha demostrat que no existeixen diferències fonamentals entre les condicions d'operació del reblat auto perforant i de la seva tècnica híbrida associada quan s'empren adhesius que presenten viscositats elevades. El perfil de força-desplaçament es modifica lleugerament, de tal manera, que es necessitava un esforç major per aconseguir el desplaçament prefixat quan s'empra el control de distància.



Figura 101. Unió híbrida rivbonding.

Font: <http://www.infotaller.tv>.

#### 4.2.3. Avantatges i inconvenients

En línies generals, les principals avantatges e inconvenients d'aquests processos respecte dels corresponents processos sense la presència de l'adhesiu són les mateixes que les ressaltades pel cas del weldbonding.

#### 4.2.4. Aplicacions

Els adhesius emprats en l'assemblatge de carrosseries normalment formen part d'un procés híbrid d'unió. Per exemple, les unions estructurals de la carrosseria s'obtenen mitjançant reblat més adhesius, particularment als vehicles íntegres d'alumini com Jaguar XJ. La tècnica híbrida de rivbonding s'ha emprat també en l'assemblatge i accessoris de la sèrie 5 de BMW, en la unió de la part frontal d'alumini al cos d'acer.

#### 4.3. Unió Arc-Làser

##### 4.3.1. Descripció

La soldadura híbrida arc-làser és un procés que combina els avantatges del làser i les de la soldadura per arc, donant lloc a soldadures de penetració profunda i bones toleràncies. La font de làser pot ser, entre altres, de CO<sub>2</sub> i es poden combinar amb MIG/MAG, TIG o arc plasma.

Tot i que en un principi semblen dos processos individuals que actuen seqüencialment, en realitat la soldadura arc-làser es pot veure com la combinació de dos processos que actuen simultàniament.



Figura 102. Unió híbrida arc/làser.

Font: <http://archive.nrc-cnrc.gc.ca>.

La font de làser incideix sobre el metall escalfant-lo localment fins a la temperatura de vaporització i formant una cavitat al metall. Aquest vapor metàl·lic interacciona amb l'arc per tal de permetre que aquest sigui estable a velocitats de soldadura similars a les de la soldadura làser autògena, inclús superiors a les de soldadura per arc.

L'arc permet obtenir un bany de fusió de majors dimensions que a la soldadura làser autògena, augmentant les toleràncies al posicionament o de preparació de cantonades tan restrictives del làser.

En el cas de la soldadura híbrida làser-MAG el material aportat permet salvar separacions entre xapes bastant àmplies.

#### 4.3.2. Aplicacions

El procés híbrid arc-làser es pot aplicar a una gran varietat de tipus i espessors de materials i s'empra en:

- Construcció naval
- Indústria petroquímica
- Indústria petroquímica
- Sector aeroespacial
- Sector d'automoció
- Sector metall-mecànic

#### 4.4. Unió MIG-Plasma

La soldadura híbrida arc Plasma-MIG és un procés de soldadura que combina l'arc d'alta densitat energètica del procés plasma juntament amb l'elevada taxa de deposició del procés MIG. El resultat és un procés robotitzat amb elevades velocitats de soldadura, bona penetració i amb un nombre elevat d'aplicacions.



Figura 103. Eina de soldadura híbrida arc/làser.

Font: <http://www.oxigar.es>.

#### **4.4.1. Principi de funcionament**

En aquest procés híbrid, l'arc de plasma precedeix al de MIG. Tots dos conserven la polaritat comunament utilitzada en els processos independents (MIG polaritat inversa, plasma elèctrode al (-) o polaritat directa). La manera de transferència del metall d'aportació és polvoritzat.

Hi ha principalment tres diferències pel que fa al funcionament dels dos arcs per separat:

- En el procés MIG es produeix un pre-escalfament del fil MIG a causa del procés plasma anterior.
- Es produeix una millora de la transferència de corrent a l'elèctrode consumible.
- Existeix una interacció magnètica entre els dos processos. Aquesta interacció exerceix una força en l'arc del procés plasma avançant aquest cap a l'adreça de soldadura, compensant la seva tendència natural a desviar-se per darrere de l'eix de la torxa durant la soldadura a elevada velocitat.

#### **4.4.2. Paràmetres**

Els de tots dos processos independents:

- Velocitat de soldadura.
- Intensitat de la font de plasma.
- Intensitat i voltatge de la font de MIG.
- Cabal de gas de que influeix en la desviació entre tots dos arcs quan treballen en comú.

#### **4.4.3. Avantatges**

Els efectes resultants de la combinació dels dos processos són:

- Augment de l'estabilitat de l'arc-plasma.
- Major penetració.
- Augment de la velocitat de soldadura.
- Menor calor aportada a la unió.

#### 4.4.4. Inconvenients

El nombre de paràmetres a ajustar és elevat, doncs se sumen els de tots dos processos independentment.

#### 4.4.5. Aplicacions

El procés MIG-plasma és un procés de recent aparició. És capaç de soldar la majoria de les aplicacions dels processos a l'arc. Es coneixen aplicacions industrials del soldadura d'acers al carboni de fins a 12 mm d'espessor, amb configuració d'unions xapa-xapa i xapa-tub.

#### 4.4.6. Equips

L'equip necessari per realitzar la soldadura MIG-plasma està compost bàsicament per:

- Font o generador d'alimentació de tensió constant per a procés MIG.
- Font o generador d'alimentació d'intensitat constant per a procés Plasma.
- Unitat de control per a la regulació de paràmetres de soldadura.
- Torxa específica per al procés híbrid.
- Alimentador de fil.
- Equip d'ampolles i mesuradors de caudals per subministrar el cabal necessari del gas de protecció.

La instal·lació necessària per a aquest procés consta d'una torxa de soldadura que té una sola tovera de gas de protecció i en el seu interior hi ha una punta de contacte MIG i una tovera de plasma.

### 4.5. Defectes

#### 4.5.1. Weldbonding

La unió híbrida per "weldbonding" arrossega els defectes típics de les dues tècniques de les que procedeix. Es resumeixen a continuació els defectes més habituals que es poden trobar en un adhesiu curat.

- **Porositat:** causada per gasos i elements volàtils presents a l'adhesiu.

- **Forats:** els forats poden formar-se per coalescència de porus, tot i que són provocats més freqüentment per l'obtenció d'aire durant l'aplicació de l'adhesiu, per presència d'elements volàtils o per l'aplicació d'una quantitat insuficient d'adhesiu.
- **Zones de curat incorrecte:** pot donar-se un curat incorrecte local degut a la presència de contaminants o per una mala mescla, però és més probable que es produeixi a través de la línia d'unió per una incorrecta formulació, mesclat o exposició tèrmica.
- **Fissures o esquerdes:** estan associades al curat i a la contracció tèrmica durant la fabricació.
- Defectes en la interfase adhesiu-adherent.

A més de tot això, la unió per weldbonding presenta una sèrie de defectes associats al propi procés híbrid:

- **Inestabilitat Saffman-Taylor:** existeix el risc de la formació de grans porus al voltant de la soldadura si es produeix l'expansió de bombolles de gas procedents de l'adhesiu. El gas pot ser aire atrapat o generar-se a partir de la descomposició de productes d'una petita quantitat d'adhesiu escalfat per la soldadura.
- **Dipòsits carbonitzats d'adhesiu entorn a la soldadura:** pot produir-se la degradació tèrmica de l'adhesiu en les zones properes al punt de soldadura.

#### 4.5.2. Unió Mecànica combinada amb Unió Adhesiva

Al igual que en el cas del welbonding, les unions mecàniques combinades amb adhesiu tenen la defectologia pròpia de cada tècnica individual. Els defectes propis de l'adhesiu curat estan exposats a l'apartat anterior mentre que els corresponents a les unions mecàniques es detallen a continuació:

- Cap del rebló massa profund o massa sobresortit (només en el reblat auto perforant).
- Part inferior del rebló fissurat (només al reblat auto perforant).
- Xapa inferior perforada.
- Dany sever al recobriment de la xapa.
- Espaiament entre xapes.



- Botó asimètric.

En referència als defectes associats al propi procés híbrid, caldria considerar una excessiva eliminació d'adhesiu de les zones pròximes al ancoratge mecànic degut a l'esforç exercit durant el procés.

#### **4.6. Control de qualitat**

##### **4.6.1. Requeriments de qualitat**

Actualment, no existeixen normes nacionals o internacionals que defineixin els requeriments de qualitat per aquest tipus d'unions híbrides, però hi ha normes i procediments interns d'empreses que depenen en gran mesura de l'aplicació. Els més habituals són els següents:

- Mida del punt i mode de fractura.
- Aparença visual.
- Resistència estàtica.

A la pràctica, per a la realització dels assajos de resistència, tant estàtica com dinàmica, es solen tenir en compte les normes referents a adhesius i a soldadura per resistència per punts.

##### **4.6.2. Monitorització i control de la qualitat**

Cal tenir en compte els aspectes corresponents de cadascuna de les tècniques constituents de la unió híbrida:

- Monitorització i control de materials i operacions de pretractament.
- Monitorització i control dels processos d'aplicació de l'adhesiu, soldadura/reblat/clenxat i curat.
- Monitorització de la qualitat de la soldadura/reblat/clenxat i del curat en línia.
- Assajos destructius i no destructius post-procés

##### **4.6.3. Assajos destructius**

Els assajos destructius post-procés són les tècniques més comunament utilitzades per assegurar la qualitat de la unió. Els més emprats són el desbotonat mitjançant "cinzell" o mitjançant pelat, per a la posterior mesura del diàmetre del punt, comprovació de l'aspecte visual i del tipus de fractura.

Altres assajos destructius són l'assaig de cisallament per tracció, el de tensió transversal, a fatiga, a torsió, a impacte, de durabilitat de l'adhesiu i anàlisis metal·logràfics.

#### **4.6.4. Assajos no destructius**

Per tal de caracteritzar l'estudi dels defectes dels adhesius en la unió híbrida es poden emprar diversos mètodes com ultrasons, radiografia o termografia de baixa freqüència. En el cas de la soldadura per punts i dels ancoratges mecànics en la unió híbrida es poden emprar els mètodes d'ultrasons o radiogràfic.

## Capítol 3. MATERIALS HÍBRIDS

---

### 1. Materials Híbrids

#### 1.1. Importància dels materials emprats en la construcció naval

En les indústries marítimes existeix un interès creixent en el disseny i fabricació d'estructures cada vegada més lleugeres, que permetin l'explotació comercial de bucs més veloços, amb major capacitat de càrrega de pagament, major autonomia i un menor consum de combustible.

La competència en preus en la indústria naval ha estat molt forta i s'ha incrementat durant els últims anys. Per mantenir la posició al mercat i guanyar nous contractes, les drassanes han d'esforçar-se a augmentar la productivitat i eficiència, rebaixant els costos generals i els relatius a la mà d'obra.

En totes les temptatives de millorar la competitivitat se sol donar poca importància al capítol dels materials emprats encara que és aquest, sens dubte, un dels més importants factors de cost. No únicament pels potencials estalvis directes que es poden obtenir comprant el material correcte en l'instant precís, reduint d'aquesta manera els costos financers, sinó també per la importància d'evitar manques en l'aprovisionament i no retardar per aquesta causa el procés productiu. La qual cosa és de vital importància.

Com a regla general, es pot prendre la següent distribució de costos per a un buc de nova construcció, encara que sense oblidar que per a certs tipus de bucs aquests nombres poden variar lleugerament.

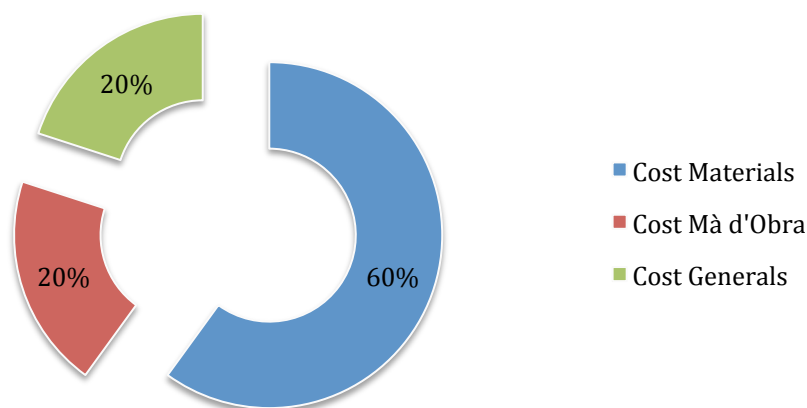


Figura 104. Distribució de costos.

Font: <http://oa.upm.es>.

Com queda palès, un 10% d'estalvi a la mà d'obra proporciona un estalvi global del 2% mentre que un 10% d'estalvi en el capítol de materials suposa un 6% dels costos de la nova construcció. Per a bucs de guerra el cost dels materials pot ser fins i tot superior, aconseguint en ocasions fins a un 80% del cost total.

La competitivitat ha de ser buscada, doncs, en l'optimització dels materials emprats i no tant en la reducció dels costos laborals, especialment en països amb una mà d'obra cara.

Els actuals reptes en la investigació i la tecnologia naval se centren en:

- El desenvolupament de plataformes modulars més àgils i mediambientalment més eficients (menors emissions i consum de combustible).
- Àmplia capacitat d'operació automatitzant aquesta al màxim i amb un cicle de vida de cost reduït que inclogui un diagnòstic intel·ligent (menor cost de manteniment).

I en el cas dels bucs destinats a les operacions militars, a més capacitat per assegurar la seva operativitat en les diferents localitzacions dels teatres d'operacions tàctics i estratègics (focalitzant aquests esforços en la predicció i control dels moviments de la plataforma, en la seva maniobrabilitat, en la minimització dels registres tèrmics, acústics i magnètics, en la millora de disseny i construcció de cascots, estructures i propulsors i en general en tot allò que millori la capacitat de resposta de la plataforma).

Es per això que es planteja l'ús de materials compostos que puguin revolucionar el procés de construcció naval com en el seu moment es va produir amb l'acer.

## **1.2. Introducció als Materials Híbrids**

Primer de tot i prèviament a l'anàlisi d'exemples de materials híbrids utilitzats en la construcció naval, es veuran conceptes bàsics sobre aquests.

Els materials compostos son aquells que estan formats per dos o més materials diferents sense que es produeixi reacció química entre ells. En tot material compost es diferencien dos components. Per un costat la matriu que es el component que es presenta en fase continua actuant com a lligam i per l'altre el reforç que es l'element resistent que es presenta en fase discontinua.

Un primera classificació es la que analitza el tipus de matriu. Es parla de materials compostos de matriu metàl·lica, ceràmica, de carbó i orgànica. D'aquests últims els més utilitzats són els materials compostos de fibra de carboni amb matriu orgànica i els materials de fibra de vidre amb matriu orgànica.

Pel que fa als reforços es diferencien dos tipus, les fibres i les càrregues. Les fibres són elements en forma de fil on la relació longitud/diàmetre es inferior a 100. Les càrregues, totes les demés, són utilitzades en elements de poca responsabilitat estructural.

Com s'ha dit, els materials compostos més utilitzats són els de matriu orgànica i reforç en forma de fibres. Es per això que en els següents apartats s'analitzen amb més detall els dos tipus de components.

### 1.2.1. Matrius orgàniques

Primer de tot, es important llistar quines són les funcions que ha de complir la matriu. S'ha de donar una bona adherència entre la matriu i el reforç.

- Donar estabilitat al conjunt, transferint les càrregues al reforç.
- Protegir al reforç de la deterioració mecànica i química.
- Evitar la propagació d'esquerdes.

Les matrius orgàniques (més conegudes com plàstics) poden ser:

- **Termoplàstics**, utilitzats en aplicacions de pocs requisits, tot i que estan començant a utilitzar-se per altes prestacions.
- **Elastòmers**, utilitzats en neumàtics i cintes transportadores.
- **Termostables**, els més empleats en materials compostos d'altres prestacions.

Entre els termostables, també anomenats resines (tots ells necessiten un procés de curat per obtenir la seva estructura reticulada) es troben els següents tipus de materials per matrius:

- **Epòxids**, que tenen un ús generalitzat en altes prestacions, amb una temperatura màxima en torn d'uns 170º.
- **Bismaleïmides**, per altes temperatures (fins a 250º), utilitzades per exemple en les cantonades d'atac de les ales d'un avió militar.
- **Poliamides**, també per aplicacions d'altres temperatures (300º).

- **Fenòliques**, resistents al foc i utilitzades, per exemple, en mampares contra incendis i panells interiors d'avions.
- **Polièsters**, poc utilitzats per les seves baixes característiques mecàniques. A més, absorbeixen molta aigua i es contrauen al curar.
- **Cianoèsters**, utilitzats en aplicacions radioelèctriques (antenes), ja que presenten baixa absorció d'humitat i bona "tangent de pèrdues" (característica radioelèctrica dels materials).



Figura 105. Exemple de planxes d'elastòmer.

Font: <http://incaucho.com>.

### 1.2.2. Fibres

Els principals tipus de fibres utilitzats com reforç, pel que fa al material que les formen, són:

- **Fibres de vidre**, de gran resistència a tracció, dures, resistents a l'atac químic i flexibles. S'elaboren a partir de la sílice<sup>47</sup> (del 50% al 70% de la seva composició) i se li afegeixen altres components en funció de les propietats desitjades.
- **Fibres de carboni**, d'alta resistència i rigidesa, per l'estructura cristal·logràfica del grafit. Es poden trobar diferents tipus de fibres segons els Giga Pascals de mòdul elàstic.
- **Fibres ceràmiques**, de quars o sílice. Flexibles i amb baix allargament i gran resistència al xoc tèrmic. S'utilitzen en estructures radio transparents.

---

<sup>47</sup> Sílice: també conegut com òxid de silici (IV) o diòxid de silici, és un compost de silici i oxigen. És un dels components de la sorra. Una de les formes en què apareix naturalment és el quars.

- **Fibres orgàniques**, obtingudes a partir de polímers<sup>48</sup>. La més utilitzada es el Kevlar i presenta unes fibres amb característiques com: molt rígida, coeficient de dilatació tèrmica longitudinal nul, baixa densitat, radio transparent i amb excel·lent residència a l'impacte.
- **Fibres de Bor.**
- **Fibres metàl·liques**, d'alumini, d'acer i titani, més denses que les anteriors i d'elevat cost.

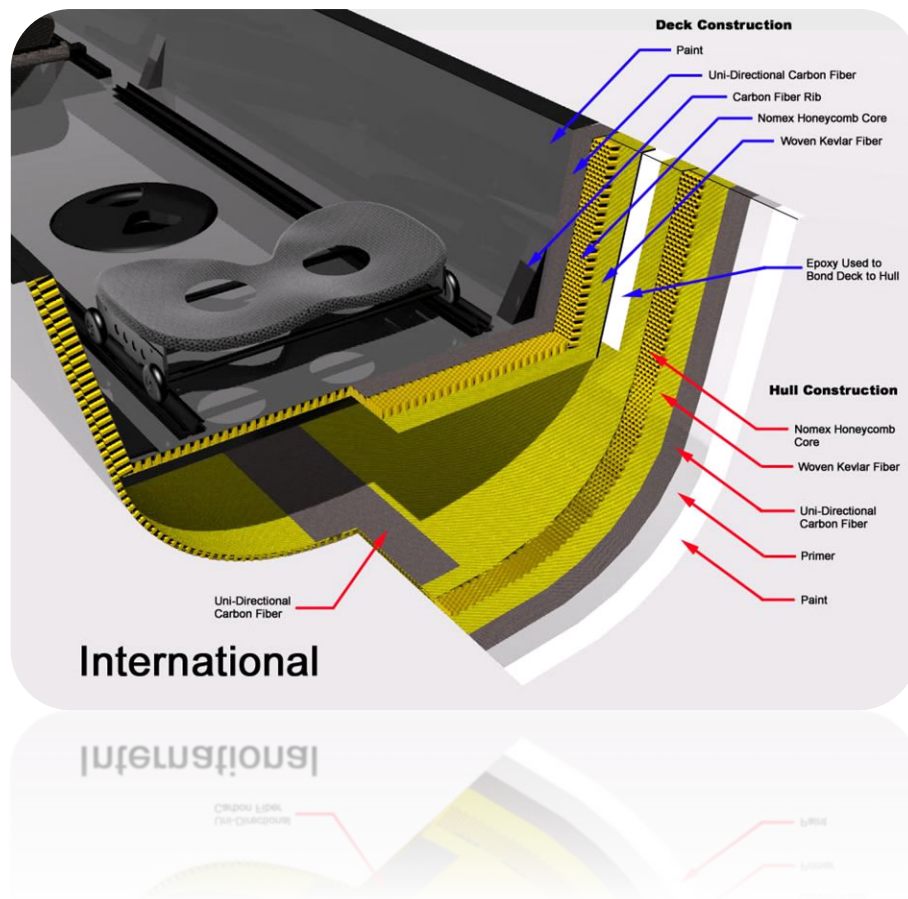


Figura 106. Exemple de l'ús d'aquestes fibres en cascos d'embarcacions de competició.

Font: <http://incaucho.com>.

Les característiques finals del material compost dependran, en gran mesura, de la quantitat de material de reforç que contingui el mateix en la seva composició global i del seu posicionament d'acord amb criteris preestablerts de càrrega.

Per facilitar el processament de les fibres (impregnació, disposició geomètrica i uniformitat d'espessors), aquestes es configuren en ordenament plans, denominades estructures tèxtils.

<sup>48</sup> Polímers: són macromolècules formades per la unió de molècules més petites anomenades monòmers. Els monòmers són molècules de petita massa molecular.

Aquestes estructures tèxtils es consideren com a materials intermedis i es presenten sota diverses configuracions:

- Feltres.
- Sistemes no mallats (teixits, assemblats, trenats).
- Sistemes mallats (malles, encadenats).

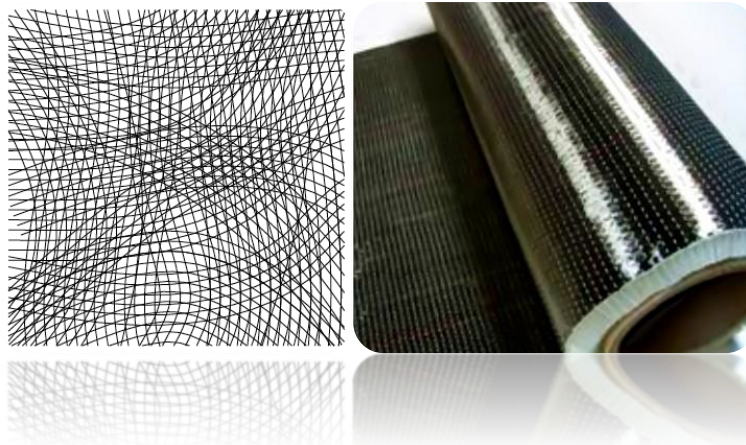


Figura 107. Exemple estructura feltre de fibres contínues.

Font: <http://upload.ecvv.com>.

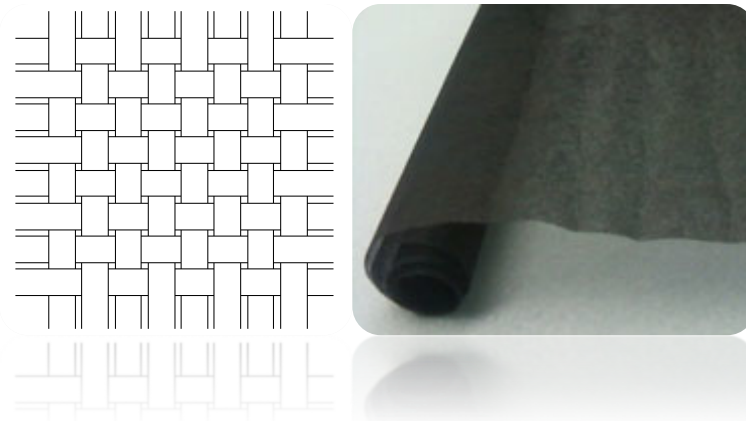


Figura 108. Exemple de teixit convencional.

Font: <http://upload.ecvv.com>.



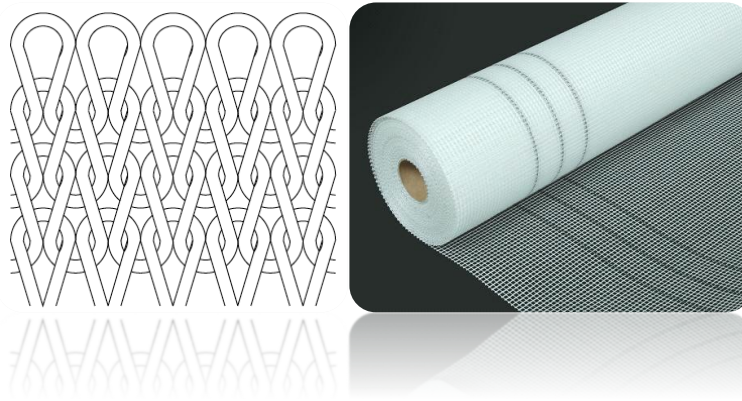


Figura 109. Exemple de fibra mallada.

Font: <http://upload.ecvv.com>.

La fibra de vidre pren importància en la nàutica d'esbarjo i per això és interessant descriure els seus orígens, classificació i processos de conformat entre altres aspectes.

#### 1.2.2.1. Fibra de vidre

La construcció d'embarcacions en materials compostos té els seus orígens en els Estats Units en els anys 30. Si bé les resines i els reforços de fibres es coneixien des de feia alguns anys, la seva utilització en la nàutica va resultar ser una mica més lenta.

La utilització de la fibra de vidre com a material de reforç en la construcció naval va ser el punt d'inflexió de la construcció d'embarcacions d'esbarjo. A la fi dels 40 ja s'exposen en fires algunes embarcacions civils realitzades amb resines i fibra de vidre, però no va ser fins a finals dels 50 quan els costos realment van començar a ser competitius. La tecnologia va ser a l'abast de les masses amb la fabricació en sèrie de vaixells de fibra de vidre després de la segona guerra mundial.

##### 1.2.2.1.1. Classificació del tipus de fibra de vidre

- **A** (alcalí): posseeix bona resistència a l'atac de solucions químiques i àcides. Però aquests elevats percentatges repercuteixen negativament en la seva resistència a l'aigua. Ha estat suplantat pel vidre E.
- **B** (bor): excel·lents propietats elèctriques i gran durabilitat.
- **C** (chemical): és un tipus de fibra amb una elevada resistència química. S'utilitza en estructures que es veuen sotmeses a atmosferes molt agressives. Propietats mecàniques entre vidre A i E.

- **D** (dielèctric): a causa de les seves altes propietats dielèctriques (pèrdues elèctriques molt febles) s'utilitza per a components electrònics i de telecomunicacions.
- **E** (elèctric): desenvolupat principalment per a aplicacions elèctriques, és el tipus de fibra de vidre de cost més reduït. També s'emptra en altres aplicacions com en la construcció de vaixells, i és la més utilitzada en la fabricació de fibres contínues. Posseeix una bona resistència a la humitat.
- **R** o **S** (resistance en francès o strength en anglès): és el tipus de fibra de major resistència. El seu principal terreny d'aplicació es troba en els camps militar i aeroespacial. La relació resistència/pes és superior al vidre E. Ofereix una major resistència a la tracció i a la fatiga.

#### 1.2.2.1.2. Processos de fabricació

Com es pot veure en la següent figura, existeixen diferents processos de fabricació d'embarcacions amb fibres.

Emmotllament per contacte	Emmotllament assistit per buit	Emmotllament per via líquida
Laminat per contacte	Laminat per contacte assistit per buit	RTM <sup>49</sup>
Projecció simultània	Pre-impregnats	VARTM <sup>50</sup>
Impregnats	Pre-Impregnats parcial	Infusió

Figura 110. Processos de fabricació.

Entre tots ells, seguint la tendència d'aconseguir laminats amb millors propietats físiques i mecàniques i de producció semi artesanal (amb un alt valor afegit i d'un número reduït d'unitats), en destaquen els processos de laminat per contacte assistit per buit i pre-impregnats.

<sup>49</sup> RTM: resin transfer molding o emmotllament de resina per transferència.

<sup>50</sup> VARTM: emmotllament de resina per transferència aplicant-hi buit.

D'altra banda, per tal d'adequar els processos constructius per complir les normatives mediambientals, sense renunciar a la qualitat dels laminats, i destinats a la producció d'un nombre elevat d'unitats amb preus competitius, prenen importància els processos RTM i infusió.



Figura 111. Exemple laminat manual i del corró utilitzat en aquesta tècnica.

Font: <http://stp.insht.es:86>.

### **Emmotllament per buit**

La tècnica de l'emmotllament per buit és utilitzada per crear pressió sobre un laminatge durant el seu cicle de guarit. La pressurització compleix diverses funcions: remou l'aire atrapat entre capes, compacta les capes de laminatge (densifica el laminatge), evita canvis d'orientació del laminatge durant el guarit, redueix la humitat i optimitza les relacions de reforç-matriu.

El procés es veu limitat pel temps de treball de la matriu polimèrica i la grandària de la peça a realitzar.

### **Avantatges del procés**

- Alts percentatges de reforç (55-60%).
- Densitat del laminatge més grans.
- Baixa taxa de porositat (contingut de bombolles).
- Millor impregnació de les fibres.
- Reducció d'emissions COV<sup>51</sup>.
- Inversió relativament baixa en equips.
- Millor aspecte de superfície interior.

---

<sup>51</sup> COV: Compostos orgànics volàtils.

### Inconvenients del procés

- Cost de materials fungibles.
- Nombrosa mà d'obra
- Requereix elevada capacitat
- Barreges de resina són encara realitzades per l'operari
- Requereix mecanitzat i sanejo posterior al desemmotllament
- Limitacions de temps de procés

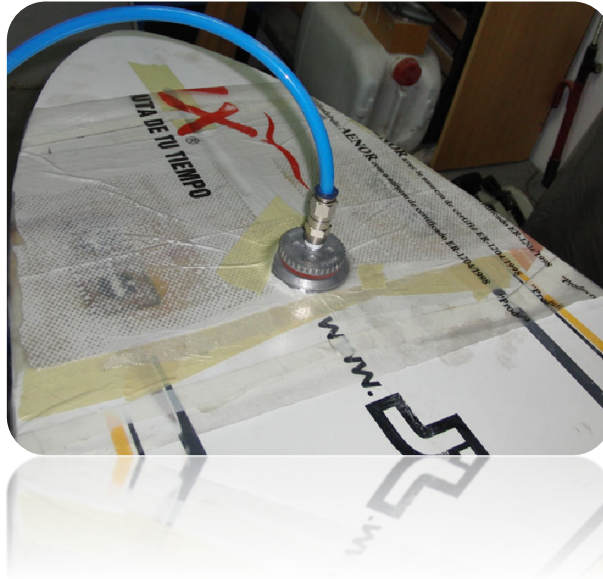


Figura 112. Exemple laminat per buit.

Font: arm8.staticflickr.com.

### Pre-impregnats

Els materials pre-impregnats són generalment estructures tèxtils impregnades amb resines reactives preparades per ser utilitzades i a les quals se'ls ralenteix el procés de reticulació <sup>52</sup> emmagatzemant-les a baixes temperatures. La impregnació es realitza mitjançant corrons d'impregnats que permeten obtenir percentatges de resina molt precisos i una bona uniformitat de l'impregnat.

El processament d'aquests materials es realitza doncs, disposant les diferents capes d'estructura tèxtil descongelada sobre l'útil (motlle), i sotmetent-les finalment a pressió i temperatura, obtenint com a resultat laminats d'alta qualitat.

---

<sup>52</sup> Procés de reticulació: reacció química que implica la formació d'una xarxa tridimensional formada per la unió de les diferents cadenes polimèriques homogènies.

### Avantatges del procés

- Elevats percentatges de reforç (fins a un 75%).
- Percentatges precisos i homogenis de la matriu sobre l'estructura tèxtil.
- Estalvis substancials de material.
- Millors condicions de treball en general (major higiene).
- Menors exposicions a elements COV.
- Millor qualitat de l'estratificat. Possibilitat de rectificar la disposició del material sobre el motlle.
- Personal no excessivament qualificat. Facilitat de manipulació del material.
- Millor organització del treball.
- Facilitat d'identificació de fallades per control rigorós del procés.

### Inconvenients del procés

- Cost elevat dels materials.
- Cost de materials fungibles.
- Temps de procés alt(compactacions).
- Motlles especials.
- Infraestructura i distribució de planta específica.
- Despeses de gestió per a control i seguiment del material altes.

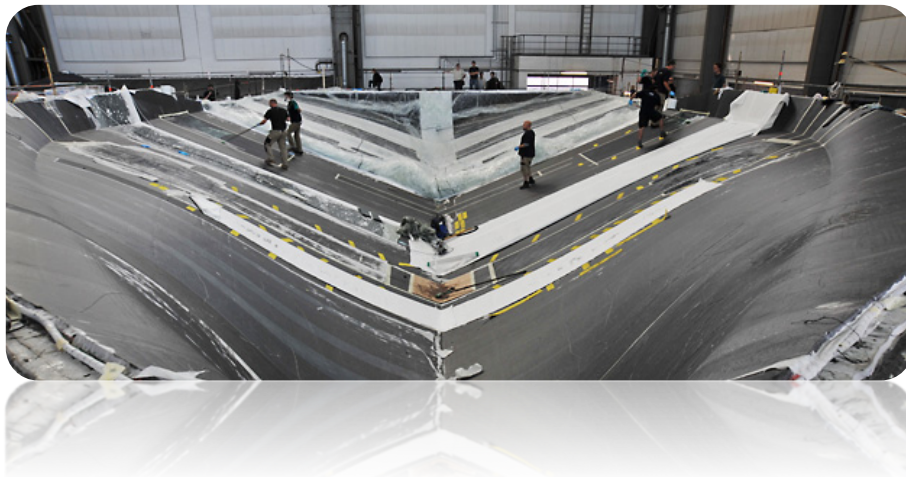


Figura 113. Pre-impregnats.  
Font: <https://www.sglgroup.com>.

## **RTM (Emmotllament de resina per transferència)**

Els teixits són col·locats secs sobre el motlle i sovint són pressionats per adquirir la forma d'aquest. Poden ser ajudats per l'acció d'un aglutinant<sup>53</sup>. Un segon motlle és llavors tancat sobre el primer, per després injectar resina en la cavitat entre tots dos motlles. Pot aplicar-se buit per ajudar a extreure l'aire atrapat interior.

Una vegada el material es troba impregnat, es tanca el pas de resina i es procedeix al guarit de la peça. Tant la injecció com el guarit poden realitzar-se a temperatura ambient o a alta temperatura.

### **Avantatges del procés**

- Possibilitat de realitzar un ampli rang de components.
- Ràpida col·locació del reforç. Optimització de l'adreça de col·locació.
- Procés adequat per a realització de components estructurals.
- Peces de qualitat uniforme i espessors homogenis.
- Bon acabat per ambdues cares de la peça.
- Cicles d'emmotllament curts.
- Baixos costos de fabricació.
- Baixes emissions de compostos volàtils orgànics.
- Possibilitat d'incorporació d'inserits.
- Altes propietats mecàniques de les peces. Percentatges propers al 55% de reforç.
- Possibilitat d'utilitzar matrius termoplàstiques.

### **Inconvenients del procés**

- Alta inversió en equips.
- Absència d'automatització.
- Cadències d'emmotllaments mitjanes comparats amb altres mètodes.
- Inconvenients amb peces de grans dimensions.

---

<sup>53</sup> Aglutinant: substància usualment líquida, que s'usa per dissoldre les substàncies que componen els pigments i s'utilitza per mantenir l'adhesió al suport determinat.

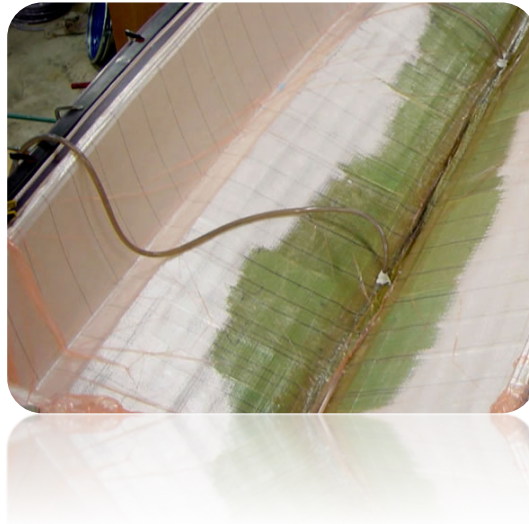


Figura 114. RTM.  
Font: tp.insht.es:86.

El procés d'infusió s'explicarà en l'apartat del Malecon©, doncs és la tècnica utilitzada per la fabricació d'aquest material híbrid.

#### **1.2.2.1.3. Problemes que presenta la fibra de vidre**

Tot i que la fibra de vidre és un material de bona qualitat, pot presentar diferents inconvenients. Aquests poden aparèixer de forma ràpida si no s'efectua un manteniment adequat.

Els problemes més freqüents en embarcacions de fibra de vidre son:

- Les esquerdes
- L'osmosi

Les esquerdes poden generar-se per multitud de diferents causes i en diferents llocs de l'embarcació:

- Peces col·locades de forma desigual. Les esquerdes poden presentar-se en forma d'estel en les zones que suporten grans esforços.
- Un fort cop que pot causar importants danys.
- Per dins de l'estructura on és tot el material encastat (banyera, lliteres, etc.).
- Unions de les mampares de fusta amb el casc on es poden produir esquerdes degudes a un moviment excessiu.



L'osmosi és un procés de degeneració que es produeix en l'estratificat de fibra de vidre. És el resultat d'una reacció química entre l'aigua i les substàncies a l'interior del casc. L'aigua penetra en el casc a través del gelcoat i, una vegada a l'interior, reacciona químicament creant substàncies àcides. Aquestes substàncies exerceixen una pressió sobre l'interior del gelcoat, que donen lloc a l'aparició de butllofes i, finalment, esquerdes. Quan el gelcoat s'ha esquerdat d'aquesta manera, el laminatge subjacent pot absorbir l'aigua com una esponja.

Com s'ha explicat en el primer capítol, aquest fenomen s'ha convertit en el major enemic d'aquest tipus d'embarcacions. Quan un vaixell de fibra de vidre pateix problemes per l'osmosi ocorre alguna cosa similar a quan un vaixell de fusta es veu sorprès per la podridura per fongs.

El temps exacte transcorregut abans que es produeixi l'osmosi depèn de molts factors, entre els quals cal incloure el tipus d'aigua on l'embarcació està amarrada, la temperatura de l'aigua i, el més important, la qualitat de construcció original del casc. En alguns casos les impureses reactivades en el gelcoat i en el laminatge produeixen osmosi en una primerenca fase de la vida de l'embarcació.



Figura 115. Inconvenients de la fibra de vidre.

Font: <http://marabierto.eu>.

Pot ser un problema estructural atribuïble al constructor del vaixell. Aproximadament el 15 per cent dels casos d'osmosis es deuen a aquesta causa que, normalment es fa evident abans dels primers anys de vida del vaixell. Tot i això, exceptuant aquest inconvenient específic, en la resta dels vaixells la seva presència esclata ràpidament o després de molts anys. Però el fet és que encara avui, mentre es disposa d'avançada tecnologia, ningú pot predir quan i en quin casc faran la seva aparició.



A més, aquest fenomen no es solament causat per l'aigua de la part exterior del casc, si no que també el pot provocar l'aigua de les sentines. Quan la indústria nàutica esportiva va començar a llançar les primeres embarcacions de fibra de vidre no es va que el gelcoat podria patir butllofes a causa del fenomen d'osmosi, ja que es suposava que era un material totalment impermeable que mantindria seques les resines i les fibres subjacents.

El indicis de que l'embarcació presenta osmosi són entre d'altres:

- Esquerdes en forma d'estel.
- Forats de la mida d'una agulla. Les butllofes petites disminueixen l'eficàcia del gelcoat i facilita una ràpida absorció d'aigua.
- Fibres que sobresurten. Algunes vegades aquestes fibres s'observen sobresortint per sota o al llarg del gelcoat i poden produir "metxes" per on l'aigua passa a l'interior del casc per l'acció capil·lar.
- Polimerització deficient del gelcoat. Es produeix en aquells punts on la resina del gelcoat s'ha barrejat incorrectament o quan s'ha aplicat en condicions inadequades i no ha polimeritzat correctament. Això produeix porositat i poden facilitar la penetració de l'aigua.



Figura 116. Inconvenients de la fibra de vidre.

Font: <http://marabierto.eu>.

Seguint amb el capítol i tal i com s'ha dit a l'inici del mateix, centrats en l'objectiu de la reducció del pes dels bucs construïts amb la tecnologia i materials actuals, cal plantejar-se dues alternatives ben diferenciades i la vegada relacionades entre elles. Per un costat la construcció d'estructures més lleugeres sobre la base de substituir els reforços tradicionals amb elements amb major rigidesa a flexió i per un altre, la construcció amb materials lleugers amb una rigidesa específica més elevada.

En tots dos casos, les construccions tipus sandvitx són les més freqüents. El sistema de plaques sandvitx (SPS) és una tecnologia creada per 'Intelligent Engineering Ltd', en la qual dues plaques de metall s'uneixen a una base sòlida d'elastòmer. L'elastòmer proporciona suport constant a les plaques i frena el vinclament local, eliminant la necessitat de reforços.

Unes altres avantatges dels SPS són la seva alta relació resistència-pes, alta capacitat d'absorció d'energia, bones propietats d'aïllament tèrmic i acústic, i resistència inherent al foc. El material inicialment es va provar per les cobertes dels bucs i la part superior dels tancs de combustible, però a dia d'avui s'han ampliat els camps d'utilització de forma continua. Els SPS es fabriquen amb:

- Pells d'alumini i un nucli de xapa corrugada unida mitjançant adhesius de fusió.
- Una combinació de pells d'acer o alumini amb un nucli de poliuretà injectat.
- Nuclis d'escuma d'alumini, fusta de bassa i fins i tot formigó lleuger.

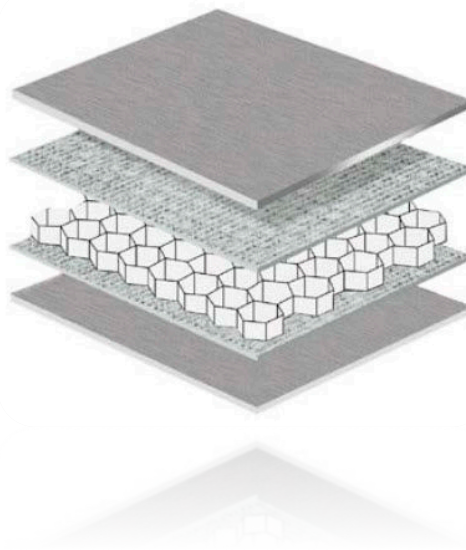


Figura 117. Exemple panell sandvitx d'acer inoxidable/niu d'abella per a bucs mercants.

Font: <http://www.nauticexpo.es>.

En tots els casos es millora la rigidesa a flexió per unitat de pes, però en cap s'aconsegueixen millores respecte a la resistència del material en el propi plànel, quan aquest és un aspecte crucial en construccions noves per sobre d'una certa grandària.

En considerar tots aquests aspectes que tenen a veure amb el disseny estructural i la seva resposta a les càrregues de servei del buc en navegació, els impactes, la transmissió tèrmica, de sorolls i de vibracions, la disminució del pes de l'estructura, amb les seves implicacions en la velocitat i el consum, etc. es plantegen diverses solucions que se centren en els denominats bucs híbrids o d'estructura híbrida i en les solucions que empen materials estructurals híbrids.

Un laminat fibra-metall resulta una bona alternativa per diverses raons, ja que estén el benefici de les propietats híbrides a la totalitat del casc, permet un ampli ús dels adhesius estructurals i té l'avantatge d'evitar solucions mecàniques a les zona d'unió entre les estructures de sol acer i sol compost, com són els reblons i inserits plàstics o metàl·lics.

### **1.3. Laminatge Fibra-Metall**

El laminatge de fibra de metall o FML (acrònim de l'anglès de Fibre Metall Laminate) és un tipus de material metàl·lic que consisteix en un laminatge de diverses capes molt fines de metall intercalades amb diverses capes de material compost. Això permet que el material es comporti com una simple estructura de metall, però amb avantatges considerables pel que fa al seu parell monolític, tals com:

- Millor tolerància a danys sobretot a impactes i fatiga del metall.
- Millor resistència a la corrosió.
- Millor resistència al foc.
- Menor pes específic.
- Adaptació a propietats mecàniques específiques.

El laminatge de fibra de metall és de vegades considerat erròniament un material compost, la seva fabricació com les seves propietats i disseny estructural guarden poca relació amb estructures compostes. Les capes de metall i material compost són repartides utilitzant principalment tècniques convencionals de materials metàl·lics, per la qual cosa els FML pertanyen a la classe de mescles heterogènies.

Actualment els materials FML més usats en la indústria són:

- El **Glare**: capes de metall intercalades amb capes de fibra de vidre.
- L'**Arall**: capes de metall intercalades amb capes de fibra d'aramida.

El desenvolupament del Glare i dels materials laminats de fibra de metall van començar en 1945 pel fabricant d'avions holandès Fokker<sup>54</sup> tan bon punt la companyia d'avions britànica De Havilland notessin les millores en les propietats de l'alumini laminat enfront de l'alumini monolític<sup>55</sup>.

No va ser fins a 1970 on investigadors de la Universitat tecnològica de Delft realitzarien els majors avanços en aquest tipus de material amb el desenvolupament de l'Arall. Però a causa d'algunes limitacions estructurals de l'ARALL per a l'ús aeronàutic, aquestes investigacions van continuar fins a 1980 en conjunt amb la companyia multinacional AkzoNobel. Finalment les investigacions van concloure amb el desenvolupament del GLARE patentat per aquesta companyia en 1987, citant com a inventors a Roebroeks i Vogelesang, dos antics professors de la facultat d'enginyeria aeroespacial de la Universitat de Delft.

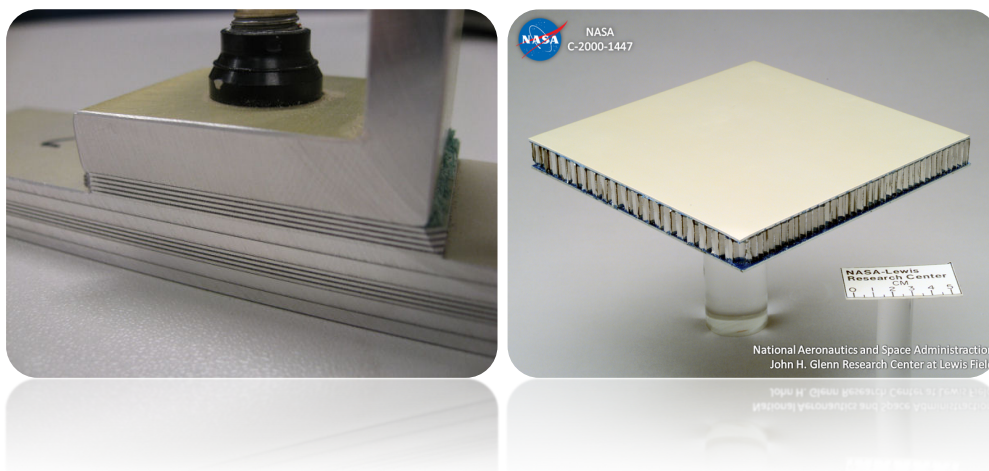


Figura 118. Exemple FML Glare.

Font: <http://www.lr.tudelft.nl>.

Més tard, la NASA mostraria interès en l'enfortiment de les peces de metall amb materials composts, com a part del programa del transbordador espacial, naixent així el concepte dels materials laminats de fibra de metall.

<sup>54</sup> Fokker: va ser un fabricant d'aeronaus dels Països Baixos anomenat com el seu fundador, Anthony Fokker.

<sup>55</sup> Alumini monolític: Fa referència a l'alumini com a material molt compacte, amb una unió tan forta entre les seves diferents parts com si fora d'una sola peça.

Actualment el Glare és considerat un dels millors materials FML, el qual a més recentment va rebre un certificat per part de l'Administració Federal d'Aviació i l'Agència Europea de Seguretat Aèria per ser utilitzat en aeronaus civils com en l'avió comercial Airbus A380.



Figura 119. Exemple FML Glare.  
Font: <http://www.airbus.com>.

En el sector naval, amb l'objectiu de trobar estructures més lleugeres es pot actuar de diverses formes:

- Una opció és emprar acer en la secció central del casc (on es precisa major resistència i rigidesa) i materials composts en proa i popa (on les formes són més complexes).
- L'altra opció és construir una estructura de barres d'acer i utilitzar panells de material compost en el folro del casc.

En tots dos casos, les unions de materials creen punts febles en l'estructura i són difícils de resoldre satisfactòriament. Així doncs, creix la necessitat d'aprofitar les qualitats que dóna l'ús de laminats fibra metall amb l'objectiu de desenvolupar materials híbrids amb aplicació directe en el sector naval. Un bon exemple es el material híbrid Malecón©.

Els materials híbrids obren noves possibilitats a l'hora d'aconseguir prestacions inassolibles per als materials tradicionals. La utilització de materials de diferent naturalesa (orgànica/inorgànica), combinats a una escala adequada i amb una organització jeràrquica dels seus components dóna lloc a l'aparició de propietats no cobertes pels materials tradicionalment emprats en diverses branques de l'enginyeria.

Les estructures de materials híbrids fibra-metall combinen el millor dels seus components, per oferir solucions intel·ligents amb prestacions incrementades capaces d'atendre a uns requisits funcionals i ambientals exigents, comptant amb menor pes, major facilitat de maneig, menor cost de fabricació i manteniment. Així, és possible combinar l'elevada resistència a l'impacte i durabilitat, juntament amb facilitat de mecanització i fabricació típiques dels materials metàl·lics, amb una elevada resistència i rigidesa específiques en l'adreça de la fibra, així com una bona resistència a la fatiga, característiques dels materials composts.

### **1.3.1. Malecon©**

Es tracta d'un material híbrid laminat fibra-metall constituït per capes d'acer i material compost de matriu de vinil-ester i reforç de fibra de vidre. Mitjançant la combinació d'aquests materials, el posicionament i orientació precises de cada capa, i la unió de les diferents capes entre si mitjançant adhesius estructurals elàstics s'aconsegueix com a producte final uns panells híbrids amb prestacions superiors als materials competidors.

El resultat és un material més lleuger, resistent, tenaç i segur, que pot ser dissenyat a mesura per atendre els requeriments específics de cada zona de l'estructura. El procediment de fabricació modular és capaç d'adaptar-se a geometries tant planes com a corbes. El procés d'assemblatge garanteix l'estanqueïtat i la correcta transmissió de càrregues d'un panell a un altre, alhora que millora la tolerància al dany de l'estructura mitjançant mecanismes que detenen la propagació d'esquerdes. El producte està patentat a Espanya i s'ha sol·licitat l'extensió internacional a Europa i Japó.

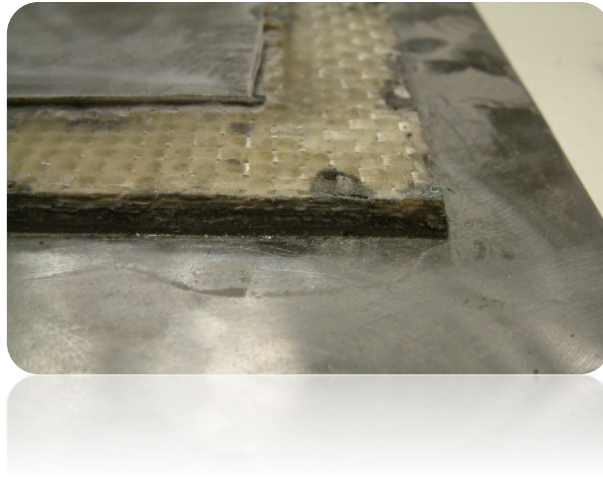


Figura 120. Panell compost fabricat amb Malecón©.

Font: <http://oa.upm.es>.

#### **1.3.1.1. Problemes que planteja l'ús de materials híbrids. Avantatges e inconvenients del Malecon©.**

Tot i que fins ara s'ha vist la vessant positiva de l'ús de materials compostos, la construcció amb aquests també planteja problemes com:

- Trencament de fibres.
- Micro-esquerdes.
- Delaminacions.
- Els contaminants.
- Porositat.
- La distribució de la matriu i les fibres.
- La seva orientació.

i en general tots els aspectes que té a veure amb les propietats micro-estructurals del compost.

L'altre gran problema d'aquest material és que, en un buc de més de 60 metres d'eslora, és molt difícil construir la seva estructura primària solament emprant materials compostos, doncs es requereix acudir a fibres de reforç com el carboni que són molt més cares que la fibra de vidre.

La raó d'això és que els materials composts no tenen la resistència en el plànol suficient que requereixen les estructures dels bucs de gran port, que en navegació sofreixen permanentment situacions de tracció i compressió segons es trobin en arrufament o en crebant sobre l'ona.

En aquests grans bucs, els esforços tallants en el plànol determinen la condició crítica de disseny, que no és el màxim moment a flexió del buc com a biga, el qual és el criteri crític de disseny de les embarcacions de menor eslora. Per aquesta raó són necessaris els nous materials capaços de satisfer els requisits de disseny i fabricació d'estructures resistents i lleugeres, capaces de permetre grans velocitats amb un menor consum energètic. En aquest sentit els materials híbrids fibra-metall combinen alta resistència a l'impacte i durabilitat, la versàtil manufactura dels metalls i les característiques mecàniques dels compostos.

L'acer, material tradicionalment emprat en la fabricació d'embarcacions i altres estructures marines, té una sèrie de limitacions que impedeix seguir millorant en la línia de construir estructures lleugeres, resistents i segures. Entre les seves virtuts es pot citar que és barat, fàcilment mecanitzable, soldable, té un comportament i propietats molt estudiades i ben conegudes, és molt tenaç i resistent a l'impacte.

D'altra banda, els desavantatges més acusats són la seva elevada densitat i els problemes de corrosió que presenta.

S'han proposat i usat altres materials alternatius en aquest sector:

- Acers d'alt límit elàstic.
- Aliatges d'alumini.
- Materials composts de matriu polimèrica.

Tots ells fan possible alleugerir les estructures, en tenir una resistència específica més elevada que la del propi acer, però sempre a costa de desatendre alguna altra prestació important per a un material que ha de ser usat en aplicacions navals.

Els acers d'alt límit elàstic són, en general, més difícils de soldar i, fonamentalment, més proclius a la fractura. Són materials d'escassa capacitat de deformació plàstica.



Els aliatges d'alumini aporten l'avantatge de la seva menor densitat respecte a l'acer, però també són menys rígides i, en conseqüència, els estalvis de pes no són tan importants. També són més difícils de soldar que l'acer i presenten, a més, problemes de corrosió-fatiga.

Els materials composts utilitzats en construcció naval (matriu de polièster o vinil-èster, reforçada amb fibra de vidre) són lleugers i resistents, però els processos de fabricació són més laboriosos i cars. A més, són molt sensibles al danya per impacte i poden presentar problemes de deterioració de les seves propietats mecàniques per absorció d'aigua (osmosi).

Enfront dels materials tradicionals, Malecon© ofereix una sèrie d'avantatges en diferents aspectes:

- Des del punt de vista del disseny, es tenen estructures més simples, amb menys elements de reforç i, per tant, més fàcils de fabricar i de reparar. El pes de l'estructura s'alleugereix en un percentatge significatiu.
- Des del punt de vista de les prestacions del material, s'aconsegueix una major rigidesa per unitat de pes, allarga la vida a fatiga i millora el comportament enfront de la corrosió. S'aconsegueix una millor resposta enfront de sobrecàrregues i impactes, esmorteix les vibracions estructurals i serveix com a material de condicionament acústic.
- Des del punt de vista de la seguretat i de la protecció enfront d'accidents, Malecon aconsegueix dissipar d'una manera més eficient l'energia associada a les col·lisions, deté o retarda la propagació d'esquerdes aconseguint un plus de resistència residual i una notable tolerància al dany, a més de suposar una barrera a la propagació del foc. El comportament enfront d'explosions i impactes balístics és superior al dels materials tradicionals.
- Des del punt de vista econòmic, l'ocupació de Malecon© permet reduir els costos de fabricació i reparació. També s'obtenen avantatges en els costos d'operació de l'embarcació en veure's reduït el consum de combustible, el manteniment al llarg de la seva vida en servei. Els costos de protecció i seguretat són, així mateix, menors en comparació dels materials tradicionals.

Existeixen altres intents d'introduir nous materials i dissenys en construcció naval, amb el mateix objectiu d'obtenir estructures més lleugeres, ràpides i segures. Com s'ha dit anteriorment, les estructures tipus sandvitx són una bona solució. Respecte aquests, Malecon© ofereix una sèrie d'avantatges en diferents aspectes:

- El nucli és de material compost de matriu polimèrica amb reforç de fibra (unidireccional o teixit), la qual cosa confereix al material resistència en el plànol de la planxa, indispensable per a la construcció d'embarcacions per sobre d'una certa grandària.
- L'arquitectura laminada permet dissenyar a mesura el material perquè s'adapti a les diferents parts de l'estructura, amb el consegüent increment de l'eficiència estructural.
- La unió del nucli a les pells mitjançant adhesius elàstics facilita que el material pugui suportar les càrregues de tall que apareixen quan treballa a flexió sense que es produeixin fallades estructurals prematures.
- L'estructura laminar permet la fabricació de les vores en escala, permetent l'assemblatge de panells plans i corbs per a la construcció modular d'estructures de gran grandària.
- Es poden introduir capes específiques que millorin la resposta enfront de l'acció del foc, la dissipació d'energia durant sobrecàrregues i impactes, l'esmoreïment de vibracions i el condicionament acústic. Tot això sense minvament de les seves propietats mecàniques.

La diferència fonamental de Malecon© respecte a altres materials competidors és que utilitza reforç de fibra contínua (unidireccional o teixit) i això li confereix una resistència en el plànol que li fa superior a tots els altres. No obstant això, per fabricar aquest tipus de material és necessari utilitzar una tecnologia específica que és la infusió de resina al buit.

### **Procés d'infusió de resina al buit**

El procés d'infusió de resina al buit és una tècnica que utilitza la pressió de buit per conduir la resina en el laminatge. Els materials es col·loquen en sec en el motlle i s'aplica el buit abans que la resina sigui introduïda. Una vegada s'aconsegueix el buit completament, la resina és introduïda al laminatge a través d'uns tubs col·locats acuradament. El procés necessita l'ajuda d'una varietat de subministraments i materials com per exemple l'ús d'adhesius industrials.

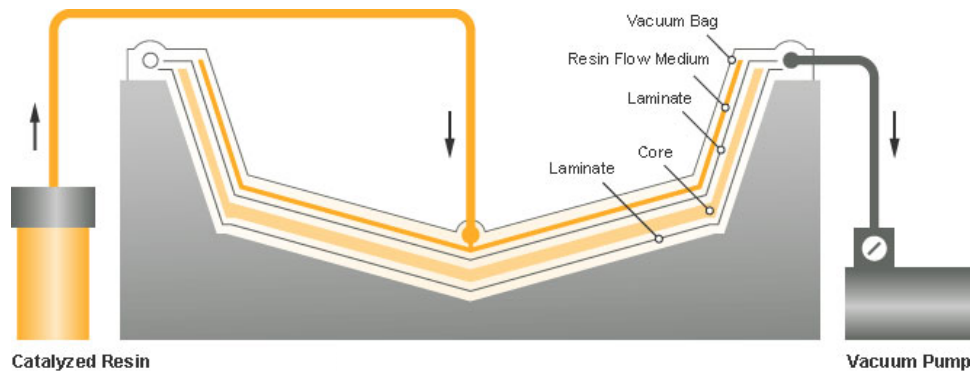


Figura 121. Esquema procés d'infusió de resina al buit.

Font: <http://lpcxiamen.com>.

### Avantatges del procés

- Ideal per a fabricació de grans peces.
- Utilització de tot tipus de matrius termostables (epòxid, polièster i vinil-èster amb viscositat adequada).
- Cost relativament baix dels motlles. Possibilitat d'adaptació de motlles existents.
- Possibilitat de construcció tant monolítica com sandvitx.
- Bones propietats mecàniques (fins a un 60% de reforç).
- Laminatges homogenis.
- Baixes emissions COV.
- Reducció de desaprofitaments de material.

### Inconvenients del procés

- Processos complexos de pre-format i posicionat de reforços.
- Alt risc d'aparició de zones seques (sense impregnació).
- Cost d'equips auxiliars i cost de materials fungibles.
- Cost elevat per a peces de petites dimensions.
- Alt risc d'aparició de marques en la superfície.

En qualsevol cas, els avantatges obtinguts en el producte final compensen les dificultats de la seva fabricació i la introducció de tecnologies de fabricació diferencials respecte als procediments tradicionals.

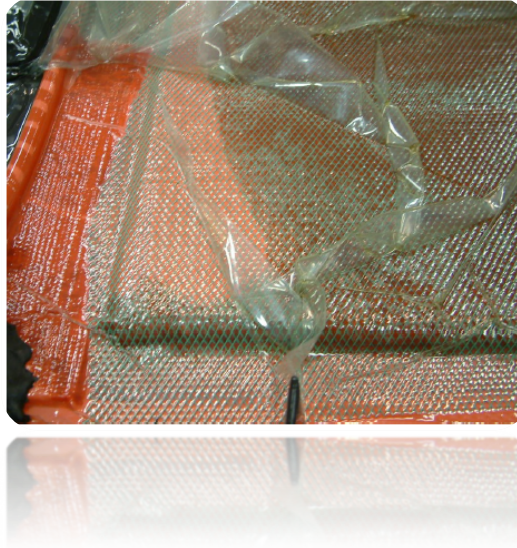


Figura 122. Procés d'infusió de resina al buit del Malecon©.

Font: <http://oa.upm.es>.

#### 1.3.1.2. Aplicacions del Malecon©

El material, tot i ser molt jove, ha participat o està en procés de fer-ho en diferents projectes dintre i fora del sector naval.

Pel que fa als projectes dintre del sector naval:

- Reparació de la coberta d'un petrolier de 240 m d'eslora. Es tracta de cobrir una superfície aproximadament de 6000 m<sup>2</sup>. El fet d'utilitzar el material híbrid Malecon©, l'ús d'acer es redueix de 1000 T a 300 T.
- Disseny de bucs oceanogràfics.
- En l'àmbit de defensa, construcció de la nova generació de fragates F-110. Aquestes requereixen velocitats de 40 nusos i una vida útil de 40 anys.

En quan als projectes fora del sector naval:

- Torres d'aerogeneradors terrestres i marines.
- Enginyeria civil: Construcció de grades, sòls, etc.



Figura 123. Logotip del producte Malecon©.

Font: <http://oa.upm.es>.

## CONCLUSIONS

---

Després d'analitzar altres treballs fets a la facultat dins del mateix camp d'investigació i veient la monopolització de la soldadura en tots ells, neix l'interès d'ampliar les mires i estudiar tècniques d'unió constructives que van tenir un paper molt important en el passat i tècniques d'unió constructives que estan en ple desenvolupament i comencen a desmarcar-se dels mètodes tradicionals.

Tot i que la tecnologia pren un paper molt important i ha permès que al llarg del temps sortissin nous mètodes i procediments aplicables en la construcció naval, s'ha donat a tot el treball un punt de vista material. Aquest és sens dubte qui ha marcat l'inici del canvi i el desenvolupament de totes aquestes tècniques.

Fins a mitjans segle XIX la fusta va ser l'únic material emprat en cascos i estructures de bucs. La construcció a base de taulons de fusta va suposar el primer salt tecnològic i l'aparició de les primeres tècniques d'unió com el calefactat. Tot i ser un material molt resistent en relació amb el seu pes específic, va presentar grans dificultats d'assemblatge i va provocar que les dimensions de la majoria dels bucs de l'època tinguessin un límit entre els 60 i els 70 metres d'eslora. Aquestes circumstàncies unides a l'exigent manteniment que requerien i a la disminució de les reserves forestals, van fer perdre importància a la construcció de bucs de fusta. Avui dia la seva ocupació està restringida a les embarcacions menors com a iots, pesquers, etc.

Tot i que posteriorment es va iniciar la construcció mixta fusta-ferro que va permetre un considerable augment de la grandària dels bucs i que en l'any 1790 apareixen les primeres naus completament construïdes amb ferro, el següent salt tecnològic important neix cap el 1880 amb les primeres embarcacions d'acer soldat. La soldadura va revolucionar el mercat industrial i va monopolitzar la construcció d'embarcacions.

Durant cent anys, sempre i quan la tecnologia ho permetia, es van desenvolupar diferents tècniques de soldadura: des de la soldadura per resistència que va ser de les primeres fins a la soldadura per arc làser. La línia de desenvolupament ha sigut i és buscar processos més fiables, efectius, econòmics i que garanteixin una qualitat alta del producte, en aquest cas de la unió soldada. Destacar la soldadura per arc elèctric amb elèctrode revestit (SMAW) que és de les tècniques més utilitzades en el sector naval perquè es pot aplicar a tot tipus d'acers i aliatges i en totes les posicions de soldadura, alhora que és una tècnica de poca dificultat en la seva execució.

La soldadura és una de les operacions més crítiques dins de la construcció del buc, quan les soldadures fallen sovint també ho fa tota l'estructura. Així doncs, tots aquest anys d'investigació i desenvolupament en el camp de la soldadura han proporcionat als constructors de vaixells actuals comptar amb processos de fabricació que es poden fàcilment automatitzar, produint soldadures consistents i fiables, i podent soldar seccions gruixudes en una sola passada amb una distorsió controlada.

L'expectativa de la qualitat de la soldadura mai ha estat tan gran. Aquesta s'aconsegueix en la pràctica a través de regles de la societat de classificació, qualificació del procediment de soldadura, certificació del soldador i de la vigilància i control de la unió soldada.

El següent canvi tecnològic neix quan les limitacions de l'acer són evidents degut a la necessitat de trobar estructures més lleugeres i amb diferents prestacions i aplicacions. La construcció generalitzada en acer, si bé ha estat un gran avanç, té els inconvenients coneguts dintre del procés constructiu, entre els quals destaca la gran quantitat de zones afectades per la calor més sensibles a la corrosió i amb pitjor resposta a la fatiga. Això suposa a llarg termini costos d'operació i de manteniment més grans.

Un avanç en aquesta línia dintre del marc de la construcció naval, han estat els materials compostos. Entre els seus avantatges destaquen la capacitat de conformat, un cost de manteniment més baix i l'alta relació resistència-pes, que tot i que suposa un important cost inicial en la construcció, condueixen a un menor cost total en la vida en servei del buc. Amb l'ús d'aquests materials, es desenvolupen processos d'unio amb adhesius industrials per tal de satisfer les necessitats constructives i de disseny.

Però la construcció en compostos també planteja problemes, com el trencament de fibres, les micro-fissures, la porositat, la distribució de la matriu i les fibres, la seva orientació i en general tots els aspectes que tenen a veure amb les propietats micro-estructurals del compost. En aquest sentit l'osmosi, com s'ha vist en el treball, és un dels principals problemes que pateixen aquests tipus de materials i quedava evidenciat en l'exemple de l'embarcació de fibra de vidre.

L'altre gran problema d'aquests materials és que, en un buc de més de 60 metres d'eslora, és molt difícil construir la seva estructura primària solament emprant materials compostos, doncs es requereix acudir a fibres de reforç com el carboni que són molt més cares que la fibra de vidre. La raó d'això és que els materials compostos no tenen la resistència en el plànol suficient que requereixen les estructures dels bucs de gran port, que en navegació pateixen permanentment situacions de tracció i compressió.

Per aquesta raó són necessaris els nous materials capaços de satisfer els requisits de disseny i fabricació d'estructures resistents i lleugeres, capaces de permetre grans velocitats amb un menor consum energètic. En aquest sentit els materials híbrids fibra-metall combinen alta resistència a l'impacte i durabilitat, la versàtil manufactura dels metalls i les característiques mecàniques dels compostos.

Aquests materials mantenen el benefici de les propietats híbrides, permetent un ampli ús dels adhesius estructurals i amb prestacions com: menys pes, facilitat d'ús, baix cost de fabricació, fàcil manteniment, etc. i seguint amb l'exemple citat anteriorment, no té l'inconvenient com la fibra de vidre amb l'osmosi.

Es cert que aquest tipus de materials ja existien anys enrere, però la seva aplicació havia sigut exclusivament dins el camp de l'aeronàutica. Per això el material híbrid Malecon© pren importància al ser pioner en desenvolupar-se expressament per tenir aplicació dins el sector naval.

L'evolució en el món de la construcció naval ha vingut donada per l'ús de diferents materials al llarg del temps. Conseqüentment cada canvi a suposat millores productives sobretot en les tècniques d'unió i assemblatge dels diferents elements d'una embarcació. En aquest cas la tecnologia ha jugat un paper molt important i ha permès que la recerca de millors prestacions sigui cada cop més exigent.

## BIBLIOGRAFIA

---

### 1. Recursos

#### 1.1. Llibres de consulta

BSEBNJAK DIETRICH, A. (2005). *Materiales compuestos: procesos de fabricación de embarcaciones*. Barcelona: Ediciones UPC.

BUJ CORRAL, I., GONZÁLEZ ROJAS, H. A., COSTA HERRERO, L., & VIVANCOS CLAVET, J. (2007). *Montajes, uniones, acabados de superficies y tratamientos térmicos*. Barcelona: ETSEIB CPDA.

CARILLO OLIVARES, F., & LÓPEZ TORRES, E. (1993). *Soldadura, corte e inspección de obra soldada*. Cádiz: Servicio de publicaciones de la Universidad de Cádiz.

GARCÍA PRIETO, M. (2010). *Apuntes de soldadura: conceptos básicos*. Madrid: Bellisco.

GRANJON, H. (1993). *Bases metalúrgicas de la soldadura*. París: Publicaciones de la Soldadura Autógena.

HERMÓGENES, G. (2005). *Soldadura*. Barcelona: CEAC.

HORWITZ, H. (2003). *Soldadura: aplicaciones y práctica*. México: Alfaomega.

JEFFUS, L., & PIQUER CABALLERO, J. (2009). *Soldadura: principios y aplicaciones*. Madrid: Paraninfo.

LÓPEZ GONZÁLEZ, P. B. (2005). *Técnicas de construcción naval*. Coruña: Universidade da Coruña.

LIESA, F., & BILURBINA, L. (2010). *Adhesivos industriales*. Barcelona: Marcombo, S.A.

MARTÍN MARTÍNEZ, J. M. (2000). *Conceptos básicos de adhesión y de uniones adhesivas*. Alicante: Universidad de Alicante.

MARTÍN MARTÍNEZ, J. M. (2000). *Conceptos básicos de adhesión y de uniones adhesivas*. Alicante: Servicio de publicaciones de la Universidad de Alicante.

PÉREZ DEL PULGAR, J. A. (1999). *La soldadura eléctrica*. Barcelona: Calpe 192.

REINA GÓMEZ, M. (1994). *Soldadura de los aceros: aplicaciones*. Madrid: Publicaciones Manuel Reina Gómez.

RODRÍGUEZ SALGADO, D. (2002). *Soldadura*. Madrid: Bellisco.



## **1.2. Pàgines web:**

### **1.2.1. Accessoris i soldadura**

<http://es.scribd.com>, data de consulta: 12/5/2012.  
<http://www.insht.es>, data de consulta: 12/5/2012.  
<http://www.mgar.net>, data de consulta: 12/5/2012.  
<http://www.demaquinyaherramientas.com>, data de consulta: 5/8/2012.  
<http://www.monografias.com>, data de consulta: 12/5/2012.  
<http://www.youtube.com>, data de consulta: 8/7/2012.  
<http://tecnologiafuentenueva.wikispaces.com>, data de consulta: 11/7/2012.  
<http://www.interempresas.net>, data de consulta: 25/7/2012.  
<http://www.esabna.com>, data de consulta: 9/8/2012.  
<http://bertan.gipuzkoakultura.net>, data de consulta: 26/8/2012.  
<http://www.vc.ehu.es>, data de consulta: 12/9/2012.  
<http://www.hiru.com>, data de consulta: 3/9/2012.  
<http://ocw.upm.es>, data de consulta: 3/9/2012.  
<http://www.encyclopedia.cat>, data de consulta: 7/8/2012.  
<http://www.slideshare.net>, data de consulta: 7/8/2012.

### **1.2.2. Materials híbrids**

<http://oa.upm.es>, data de consulta: 2/9/2012.  
<http://www.upm.es>, data de consulta: 25/8/2012.  
<http://www.gef.es>, data de consulta: 25/8/2012.  
<http://www.madrimasd.org>, data de consulta: 27/8/2012.  
<http://www.upv.es>, data de consulta: 2/9/2012.

### **1.2.3. Adhesius**

<http://repositorio.bib.upct.es>, data de consulta: 20/8/2012.  
<http://www.losadhesivos.com>, data de consulta: 20/8/2012.  
<http://www.dmpa.upm.es>, data de consulta: 21/8/2012.

# REFERÈNCIES

## Referència 1. Acers en la soldadura.

TABLAS

DUREZA

TABLA COMPARATIVA DE DUREZA

Brinell	Vickers	Rockwell C	Rockwell B	Resistencia a la tracción x 1000 psi	Brinell	Vickers	Rockwell C	Rockwell B	Resistencia a la tracción x 1000 psi
898				440	223	223	20	97	110
857				420	217	217	18	96	107
817				401	212	212	17	96	104
780	1150	70		384	207	207	16	96	101
746	1050	68		368	202	202	15	94	99
712	960	66		362	197	197	13	93	97
682	886	64		337	192	192	12	92	96
653	820	62		324	187	187	10	91	93
627	765	60		311	183	183	9	90	91
601	717	58		298	179	179	8	89	89
578	675	57		287	174	174	7	88	87
555	633	55	120	276	170	170	6	87	85
534	598	53	119	265	166	166	4	86	83
514	567	52	119	256	163	163	3	85	82
496	540	50	117	247	159	159	2	84	80
477	515	49	117	238	156	156	1	83	78
461	494	47	116	229	153	153		82	76
444	472	46	115	220	149	149		81	75
429	454	45	115	212	145	145		80	74
415	437	44	114	204	143	143		79	72
401	420	42	113	196	140	140		78	71
388	404	41	112	189	137	137		77	70
375	389	40	112	183	134	134		76	68
363	375	38	110	176	131	131		74	66
352	363	37	110	170	128	128		73	65
341	350	36	109	166	126	126		72	64
331	339	35	109	160	124	124		71	63
321	327	34	108	155	121	121		70	62
311	316	33	108	150	118	118		69	61
302	306	32	107	146	116	116		68	60
293	296	31	106	142	114	114		67	59
286	287	30	106	138	112	112		66	58
277	279	29	104	134	109	109		65	56
269	270	28	104	131	107	107		64	56
262	263	26	103	128	106	106		62	54
256	256	25	102	125	103	103		61	53
248	248	24	102	122	101	101		60	52
241	241	23	100	119	99	99		59	51
235	235	22	99	116	97	97		57	50
229	229	21	98	113	95	95		56	49

150

TABLAS							
ACEROS AL CARBONO							
Número SAE	C	Mn	P Máx.	S Máx.	Número AISI		
—	0,06 máx.	0,35 máx.	0,040	0,050	C1005		
1006	0,08 máx.	0,25-0,40	0,040	0,050	C1006		
1010	0,10 máx.	0,25-0,50	0,040	0,050	C1008		
—	0,08-0,13	0,30-0,50	0,040	0,050	C1010		
—	0,10-0,15	0,30-0,50	0,040	0,050	C1012		
—	0,11-0,16	0,30-0,50	0,040	0,050	C1013		
1015	0,13-0,18	0,30-0,50	0,040	0,050	C1015		
1016	0,13-0,18	0,30-0,50	0,040	0,050	C1016		
1017	0,15-0,20	0,30-0,50	0,040	0,050	C1017		
1018	0,15-0,20	0,30-0,50	0,040	0,050	C1018		
1019	0,15-0,20	0,30-0,50	0,040	0,050	C1019		
1020	0,18-0,23	0,30-0,50	0,040	0,050	C1020		
—	0,18-0,23	0,30-0,50	0,040	0,050	C1021		
1022	0,18-0,23	0,30-0,50	0,040	0,050	C1022		
—	0,20-0,26	0,30-0,50	0,040	0,050	C1023		
1024	0,19-0,25	1,35-1,55	0,040	0,050	C1024		
1025	0,22-0,28	0,30-0,50	0,040	0,050	C1025		
—	0,22-0,28	0,30-0,50	0,040	0,050	C1026		
1027	0,22-0,29	1,20-1,50	0,040	0,050	C1027		
—	0,25-0,31	0,30-0,50	0,040	0,050	C1029		
1030	0,28-0,34	0,30-0,50	0,040	0,050	C1030		
1033	0,30-0,36	0,70-1,00	0,040	0,050	C1033		
1034	0,32-0,38	0,50-0,80	0,040	0,050	C1034		
1035	0,32-0,38	0,60-0,90	0,040	0,050	C1035		
1036	0,30-0,37	1,20-1,50	0,040	0,050	C1036		
1038	0,36-0,42	0,60-0,90	0,040	0,050	C1038		
—	0,37-0,44	0,70-1,00	0,040	0,050	C1039		
1040	0,37-0,44	0,60-0,90	0,040	0,050	C1040		
1041	0,36-0,44	1,35-1,55	0,040	0,050	C1041		
1042	0,40-0,47	0,60-0,90	0,040	0,050	C1042		
1043	0,40-0,47	0,70-1,00	0,040	0,050	C1043		
1045	0,43-0,50	0,60-0,90	0,040	0,050	C1045		
1046	0,43-0,50	0,70-1,00	0,040	0,050	C1046		
1050	0,48-0,56	0,60-0,90	0,040	0,050	C1050		
—	0,48-0,56	0,85-1,15	0,040	0,050	C1051		
1052	0,47-0,58	1,20-1,50	0,040	0,050	C1052		
—	0,50-0,60	0,50-0,80	0,040	0,050	C1054		
1055	0,50-0,60	0,60-0,90	0,040	0,050	C1055		
—	0,50-0,61	0,85-1,15	0,040	0,050	C1057		
—	0,55-0,65	0,60-0,80	0,040	0,050	C1059		
1060	0,55-0,65	0,60-0,80	0,040	0,050	C1060		
—	0,54-0,68	0,75-1,05	0,040	0,050	C1061		
1062	0,54-0,65	0,85-1,15	0,040	0,050	C1062		
1064	0,50-0,70	0,50-0,80	0,040	0,050	C1064		
1065	0,50-0,70	0,60-0,90	0,040	0,050	C1065		
1066	0,50-0,71	0,85-1,15	0,040	0,050	C1066		
—	0,55-0,75	0,40-0,70	0,040	0,050	C1068		
1070	0,55-0,75	0,60-0,90	0,040	0,050	C1070		
—	0,55-0,76	0,75-1,05	0,040	0,050	C1071		
1074	0,70-0,80	0,50-0,80	0,040	0,050	C1074		

152

INDURA							
ACEROS							
COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACEROS							
SERIES SAE Y AISI							
SAE (Society of Automotive Engineers) y AISI (American Iron and Steel Institute) han efectuado clasificaciones extensas de los aceros de acuerdo a su composición química, llegando a establecer la siguiente normalización:							
Designación de Letras	Designación Numérica						
B: Acero al carbono (Horno Bessemer, ácido)	(100x) Aceros al carbono						
C: Acero al carbono (Horno sopleira abierta, básico)	(130x) Manganeso 1,60 a 1,90%						
E: Acero al carbono (Horno eléctrico)	(230x) Níquel 3,50%						
	(230x) Níquel 5,0%						
	(310x) Níquel 1,25% - Cromo 0,80%						
	(330x) Níquel 3,50% - Cromo 1,60%						
	(400x) Molibdeno						
	(4100x) Cromo - Molibdeno						
	(430x) Níquel - Cromo - Molibdeno						
	(460x) Níquel 1,65% - Molibdeno 0,25%						
	(480x) Níquel 3,25% - Molibdeno 0,25%						
	(5100x) Cromo						
	(5200x) Cromo y alto carbono						
	(5100x) Cromo - Vanadio						
	(8800x) Cromo - Níquel - Molibdeno						
	(8700x) Cromo - Níquel - Molibdeno						
	(9200x) Silicio 2,0% - Cromo						
	(9300x) Níquel 3,0% - Cromo - Molibdeno						
	(9400x) Níquel - Cromo - Molibdeno						
	(9700x) Níquel - Cromo - Molibdeno						
	(9800x) Níquel - Cromo - Molibdeno						

151

INDURA

ACEROS DE ALEACIÓN

Número AISI	C	Mn	P Máx.	S Máx.	Si	Ni	Cr	Otros	Número SAE
1320	0,18-0,23	1,60-1,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	—	—	1320
1321	0,18-0,23	1,60-1,90	0,050	0,040	0,20-0,35	—	—	—	—
1330	0,28-0,33	1,60-1,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	—	—	1330
1335	0,33-0,38	1,60-1,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	—	—	1335
1340	0,38-0,43	1,60-1,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	—	—	1340
2317	0,15-0,20	0,40-0,60	0,040	0,040	0,20-0,35	3,25-3,75	—	—	2317
2330	0,28-0,33	0,60-0,80	0,040	0,040	0,20-0,35	3,25-3,75	—	—	2330
2335	0,33-0,38	0,60-0,80	0,040	0,040	0,20-0,35	3,25-3,75	—	—	—
2340	0,33-0,43	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	3,25-3,75	—	—	2340
2345	0,43-0,48	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	3,25-3,75	—	—	2345
E2512	0,09-0,14	0,40-0,60	0,025	0,025	0,20-0,35	4,75-5,25	—	—	2512
E2512	0,12-0,17	0,40-0,60	0,040	0,040	0,20-0,35	4,75-5,25	—	—	2515
E2517	0,15-0,20	0,40-0,60	0,025	0,025	0,20-0,35	4,75-5,25	—	—	2517
3115	0,13-0,18	0,40-0,60	0,040	0,040	0,20-0,35	1,10-1,40	0,55-0,75	—	3115
3120	0,17-0,22	0,60-0,80	0,040	0,040	0,20-0,35	1,10-1,40	0,55-0,75	—	3120
3130	0,28-0,33	0,60-0,80	0,040	0,040	0,20-0,35	1,10-1,40	0,55-0,75	—	3130
3135	0,33-0,38	0,60-0,80	0,040	0,040	0,20-0,35	1,10-1,40	0,55-0,75	—	3135
3140	0,38-0,43	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	1,10-1,40	0,55-0,75	—	3140
3141	0,38-0,43	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	1,10-1,40	0,70-0,90	—	3141
3145	0,43-0,48	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	1,10-1,40	0,70-0,90	—	3145
3150	0,48-0,53	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	1,10-1,40	0,70-0,90	—	3150
E3310	0,10-0,13	0,50-0,60	0,025	0,025	0,20-0,35	3,25-3,75	1,40-1,75	—	3010
E3316	0,14-0,19	0,50-0,60	0,025	0,025	0,20-0,35	3,25-3,75	1,40-1,75	—	3016
Mo									
4117	0,17-0,22	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	—	0,20-0,30	4017
4023	0,20-0,25	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	—	0,20-0,30	4023
4024	0,20-0,25	0,70-0,90	0,040	0,035-0,050	0,20-0,35	—	—	0,20-0,30	4024
4027	0,25-0,30	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	—	0,20-0,30	4027
4028	0,25-0,30	0,70-0,90	0,040	0,035-0,050	0,20-0,35	—	—	0,20-0,30	4028
4029	0,30-0,35	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	—	0,20-0,30	4029
4037	0,35-0,40	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	—	0,20-0,30	4037
4042	0,40-0,45	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	—	0,20-0,30	4042
4047	0,45-0,50	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	—	0,20-0,30	4047
4053	0,50-0,56	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	—	—	0,20-0,30	4053
4059	0,60-0,67	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	—	—	0,20-0,30	4059
4068	0,68-0,70	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	—	—	0,20-0,30	4068
—	0,17-0,22	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,40-0,60	0,20-0,30	4119
—	0,25-0,28	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,40-0,60	0,20-0,30	4125
E130	0,28-0,33	0,40-0,60	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,80-1,10	0,15-0,25	4130
E4132	0,30-0,36	0,40-0,60	0,025	0,025	0,20-0,35	—	0,80-1,10	0,15-0,25	4132
E4133	0,33-0,38	0,70-0,90	0,025	0,025	0,20-0,35	—	0,80-1,10	0,15-0,25	—
E4137	0,35-0,40	0,70-0,90	0,025	0,040	0,20-0,35	—	0,80-1,10	0,15-0,25	4137
E4139	0,40-0,45	0,70-0,90	0,025	0,040	0,20-0,35	—	0,80-1,10	0,15-0,25	—
E4140	0,38-0,43	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,80-1,10	0,15-0,25	4140

TABLAS

ACEROS DE ALEACIÓN

Número AISI	C	Mn	P Máx.	S Máx.	Si	Ni	Cr	Otros	Número SAE
4142	0,40-0,45	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,80-1,10	Mo 0,15-0,25	—
4145	0,43-0,48	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,80-1,10	0,15-0,25	4145
4147	0,45-0,50	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,80-1,10	0,15-0,25	—
4150	0,48-0,53	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,80-1,10	0,15-0,25	4150
4317	0,15-0,20	0,45-0,65	0,040	0,040	0,20-0,35	1,65-2,00	0,40-0,60	0,20-0,30	4317
4320	0,17-0,22	0,45-0,65	0,040	0,040	0,20-0,35	1,65-2,00	0,40-0,60	0,20-0,30	4320
4327	0,35-0,40	0,60-0,80	0,040	0,040	0,20-0,35	1,65-2,00	0,70-0,90	0,20-0,30	—
4340	0,38-0,43	0,60-0,80	0,040	0,040	0,20-0,35	1,65-2,00	0,70-0,90	0,20-0,30	4340
4608	0,08-0,11	0,25-0,45	0,040	0,040	0,20 máx.	1,40-1,75	—	0,15-0,25	4608
4615	0,13-0,18	0,40-0,65	0,040	0,040	0,20-0,35	1,65-2,00	—	0,20-0,30	4615
—	0,15-0,20	0,45-0,65	0,040	0,040	0,20-0,35	1,65-2,00	—	0,20-0,30	4617
E4617	0,15-0,20	0,45-0,65	0,025	0,025	0,20-0,35	1,65-2,00	—	0,20-0,27	—
4620	0,17-0,22	0,45-0,65	0,040	0,040	0,20-0,35	1,65-2,00	—	0,20-0,30	4620
X4620	0,18-0,23	0,50-0,70	0,040	0,040	0,20-0,35	1,65-2,00	—	0,20-0,30 x	4620
E4620	0,17-0,22	0,45-0,65	0,025	0,025	0,20-0,35	1,65-2,00	—	0,20-0,27	—
4621	0,18-0,23	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	1,65-2,00	—	0,20-0,30	4621
4640	0,38-0,43	0,60-0,80	0,040	0,040	0,20-0,35	1,65-2,00	—	0,20-0,30	4640
E4640	0,38-0,43	0,60-0,80	0,025	0,025	0,20-0,35	1,65-2,00	—	0,20-0,27	—
4812	0,10-0,15	0,40-0,60	0,040	0,040	0,20-0,35	3,25-3,75	—	0,20-0,30	4812
4815	0,13-0,18	0,40-0,60	0,040	0,040	0,20-0,35	3,25-3,75	—	0,20-0,30	4815
4817	0,15-0,20	0,40-0,60	0,040	0,040	0,20-0,35	3,25-3,75	—	0,20-0,30	4817
4820	0,18-0,23	0,50-0,70	0,040	0,040	0,20-0,35	3,25-3,75	—	0,20-0,30	4820
5045	0,43-0,48	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,55-0,75	—	5045
5048	0,43-0,58	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,55-0,75	—	5048
—	0,13-0,18	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,70-0,90	—	5115
5120	0,17-0,22	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,70-0,90	—	5120
5130	0,28-0,33	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,80-1,10	—	5130
5132	0,30-0,35	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,80-1,10	—	5132
5135	0,33-0,38	0,60-0,80	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,80-1,05	—	5135
5140	0,38-0,43	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,70-0,90	—	5140
5145	0,43-0,48	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,70-0,90	—	5145
5147	0,45-0,52	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,80-1,20	—	5147
5150	0,48-0,53	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,70-0,90	—	5150
5152	0,48-0,55	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,90-1,20	—	5152
E50100	0,95-1,10	0,25-0,45	0,025	0,025	0,20-0,35	—	0,40-0,60	—	50100
E51100	0,95-1,10	0,25-0,45	0,025	0,025	0,20-0,35	—	0,90-1,15	—	51100
E52100	0,95-1,10	0,25-0,45	0,025	0,025	0,20-0,35	—	1,30-1,80	—	52100
6120	0,17-0,22	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,70-0,90	0,10 mín.	—
6145	0,43-0,48	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,80-1,10	0,15 mín.	—
6150	0,48-0,53	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,80-1,10	0,15 mín.	—
6152	0,48-0,55	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	—	0,80-1,10	0,10 mín.	—

154

TABLAS

COMPOSICIÓN QUÍMICA DE LOS ACEROS INOXIDABLES

Tipo AISI	Carbono %	Manganeso Máximo %	AUSTENÍTICOS				Otros
			Silicio Máximo %	Cromo %	Níquel Elementos %		
201	0,15 máx.	5,5/7,5	1,00	16,00/18,00	3,50/5,50		Ni 0,25 máx.
202	0,15 máx.	7,5/10,00	1,00	17,00/19,00	4,00/6,00		Ni 0,25 máx.
301	0,15 máx.	2,00	1,00	16,00/18,00	6,00/8,00		
302	0,15 máx.	2,00	1,00	17,00/19,00	8,00/10,00		
302B	0,15 máx.	2,00	2,00/3,00	17,00/19,00	8,00/10,00		
303	0,15 máx.	2,00	1,00	17,00/19,00	8,00/10,00		S 0,15 mín.
303Se	0,15 máx.	2,00	1,00	17,00/19,00	8,00/10,00		Se 0,15 mín.
304	0,08 máx.	2,00	1,00	18,00/20,00	8,00/12,00		
304L	0,03 máx.	2,00	1,00	18,00/20,00	8,00/12,00		
305	0,12 máx.	2,00	1,00	17,00/19,00	10,00/13,00		
308	0,08 máx.	2,00	1,00	19,00/21,00	10,00/12,00		
309	0,20 máx.	2,00	1,00	22,00/24,00	12,00/15,00		
309S	0,08 máx.	2,00	1,00	22,00/24,00	12,00/15,00		
310	0,25 máx.	2,00	1,50	24,00/26,00	19,00/22,00		
310S	0,08 máx.	2,00	1,50	24,00/26,00	19,00/22,00		
314	0,25 máx.	2,00	1,50/3,00	23,00/26,00	19,00/22,00		
316	0,08 máx.	2,00	1,00	16,00/18,00	10,00/14,00		Mo 2,00/3,00
316L	0,03 máx.	2,00	1,00	16,00/18,00	10,00/14,00		Mo 2,00/3,00
317	0,08 máx.	2,00	1,00	18,00/20,00	11,00/15,00		Mo 3,00/4,00
321	0,08 máx.	2,00	1,00	17,00/19,00	9,00/12,00		Ti 5 x C mín.
347	0,08 máx.	2,00	1,00	17,00/19,00	9,00/13,00		Cb + Ta 10 C mín.
348	0,08 máx.	2,00	1,00	17,00/19,00	9,00/13,00		Cb + Ta 10 C mín.
MARTENSÍTICOS							
403	0,15 máx.	1,00	0,50	11,50/13,00			Al 0,10/0,30
405	0,08 máx.	1,00	1,00	11,50/14,50			
410	0,15 máx.	1,00	1,00	11,50/13,50		1,25/2,50	
414	0,15 máx.	1,00	0,50	11,50/13,50			
416	0,15 máx.	1,25	1,00	12,00/14,00			S 0,15 mín.
416Se	0,15 máx.	1,25	1,00	12,00/14,00			Se 0,15 mín.
420	Sobre 0,15	1,00	1,00	12,00/14,00		1,25/2,50	
431	0,20 máx.	1,00	1,00	15,00/17,00			
440A	0,60/0,75	1,00	1,00	16,00/18,00			Mo 0,75 máx.
440B	0,75/0,95	1,00	1,00	16,00/18,00			Mo 0,75 máx.
440C	0,95/1,20	1,00	1,00	16,00/18,00			Mo 0,40/0,65
501	Sobre 0,10	1,00	1,00	4,00/6,00			Mo 0,40/0,65
502	0,10 máx.	1,00	1,00	4,00/6,00			
FERRÍTICOS							
405	0,08 máx.	1,00	1,00	11,50/14,50			
430	0,12 máx.	1,00	1,00	14,00/18,00			
430F	0,12 máx.	1,25	1,00	14,00/18,00			S 0,15 mín.
430FS	0,12 máx.	1,25	1,00	4,00/18,00			Se 0,15 mín.
442	0,20 máx.	1,00	1,00	19,00/23,00			
446	0,20 máx.	1,50	1,00	23,00/27,00			Ni 0,25 máx.

156

INDURA

ACEROS DE ALEACIÓN

Número AISI	C	Mn	P Máx.	S Máx.	Si	Ni	Cr	Mo	Número SAE
8615	0,15-0,18	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,50-0,60	0,15-0,25	8615
8617	0,15-0,20	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25	8617
8620	0,18-0,23	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25	8620
8622	0,20-0,25	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25	8622
8625	0,23-0,28	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25	8625
8627	0,25-0,30	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25	8627
8630	0,28-0,33	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25	8630
8632	0,30-0,35	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25	8632
8635	0,33-0,38	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25	8635
8637	0,35-0,40	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25	8637
8640	0,38-0,43	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25	8640
8641	0,38-0,43	0,75-1,00	0,040	0,040-0,60	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25	8641
8642	0,40-0,45	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25	8642
8645	0,43-0,48	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25	8645
8647	0,45-0,50	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25	8647
8650	0,48-0,53	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25	8650
8653	0,50-0,56	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25	8653
8655	0,50-0,60	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25	8655
8660	0,50-0,65	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25	8660
8720	0,18-0,23	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,20-0,30	8720
8735	0,33-0,38	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,20-0,30	8735
8740	0,38-0,43	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,20-0,30	8740
8742	0,48-0,45	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,20-0,30	—
8745	0,43-0,48	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,20-0,30	8745
8747	0,45-0,50	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,20-0,30	—
8750	0,48-0,53	0,75-1,00	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,40-0,60	0,20-0,30	8750
—	0,58-0,60	0,50-0,60	0,040	0,040	1,20-1,60	—	0,50-0,80	—	9254
9255	0,58-0,60	0,70-0,95	0,040	0,040	1,80-2,20	—	—	—	9254
9256	0,55-0,65	0,50-1,00	0,040	0,040	0,40-0,60	0,40-0,70	0,40-0,60	0,15-0,25	9256
9261	0,55-0,65	0,75-1,00	0,040	0,040	1,80-2,20	—	0,10-0,25	—	9261
9262	0,55-0,65	0,75-1,00	0,040	0,040	1,80-2,20	—	0,050-0,40	—	9262
9310	0,08-0,13	0,45-0,65	0,025	0,025	0,20-0,35	0,30-0,50	1,00-1,40	0,80-0,15	9310
9315	0,13-0,18	0,45-0,65	0,025	0,025	0,20-0,35	0,30-0,50	1,00-1,40	0,80-0,15	9315
9317	0,15-0,20	0,45-0,65	0,025	0,025	0,20-0,35	0,30-0,50	1,00-1,40	0,80-0,15	9317
9437	0,35-0,40	0,90-1,20	0,040	0,040	0,20-0,35	0,30-0,60	0,30-0,50	0,80-0,15	9437
9440	0,38-0,43	0,90-1,20	0,040	0,040	0,20-0,35	0,30-0,60	0,30-0,50	0,80-0,15	9440
9442	0,40-0,45	1,00-1,30	0,040	0,040	0,20-0,35	0,30-0,60	0,30-0,50	0,80-0,15	9442
9445	0,43-0,48	1,00-1,30	0,040	0,040	0,20-0,35	0,30-0,60	0,30-0,50	0,80-0,15	9445
9447	0,45-0,50	0,50-0,80	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,10-0,25	0,15-0,25	9447
9670	0,50-0,60	0,50-0,80	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,10-0,25	0,15-0,25	9670
9672	0,50-0,60	0,50-0,80	0,040	0,040	0,20-0,35	0,40-0,70	0,10-0,25	0,15-0,25	9672
9845	0,43-0,48	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	0,85-1,15	0,70-0,90	0,20-0,30	9840
9850	0,48-0,53	0,70-0,90	0,040	0,040	0,20-0,35	0,85-1,15	0,70-0,90	0,20-0,30	9850



Referència 2. Temes generals de soldadura.

TEMAS GENERALES DE SOLDADURA

ESTIMACIÓN DE COSTOS EN SOLDADURA

Introducción

Cada trabajo de soldadura presenta al diseñador y al calculista sus propias características y dificultades, por lo cual, el modelo de costos que a continuación se desarrolla, propone un rango de generalidad amplio que permite abarcar cualquier tipo de aplicación.

Por otro lado, se intenta enfocar el problema con un equilibrio justo entre la exactitud y la simplicidad, es decir proponiendo fórmulas de costos de fácil aplicación, aun cuando ello signifique eliminar términos de incidencia leve en el resultado buscado.

Determinación de Costos en Operaciones de Soldadura

FÓRMULAS Base de Cálculo: metro lineal (mL)

Costo electrodo	$\frac{(\$)}{\text{m.L.}} = \frac{\text{Pmd (kg/ml)} \times \text{Valor electrodo (\$/kg)}}{\text{Eficiencia deposición (\%)}}$
Costo M.O. y G. Grales.	$\frac{(\$)}{\text{m.L.}} = \frac{\text{Pmd (kg/ml)} \times \text{Valor M.O. y G.G. (\$/hr)}}{\text{Velocidad deposición (kg/hr)} \times \text{F. operación (\%)}}$
Costo gas	$\frac{(\$)}{\text{m.L.}} = \frac{\text{Pmd (kg/ml)} \times \text{Flujo gas (m}^3\text{/hr)} \times \text{Valor gas (\$/m}^3\text{)}}{\text{Velocidad deposición (kg/hr)}}$
Costo fundente	$\frac{(\$)}{\text{m.L.}} = \frac{\text{Pmd (kg/ml)} \times \text{F. uso (\%)} \times \text{Valor fundente (\$/kg)}}{\text{Velocidad deposición (kg/hr)}}$

Note: A continuación se definen conceptos previamente mencionados, además de rangos con valores de los parámetros que son normales en toda la industria de la soldadura.

1. Peso metal depositado:

Cantidad de metal de aporte necesario para completar una unión soldada. Relación para determinar peso metal depositado.

$$\text{Pmd} = \text{Área seccional} \times \text{longitud} \times \text{densidad aporte.}$$

Unión de soldadura						
Espesor (E) mm	METAL DEPOSITADO (kg/ml) (acero)					
3,2	0,045	0,098	0,380	0,358		
6,4	0,177	0,190	0,638	0,606		
9,5	0,306					
12,5	0,708		1,168	1,066		
16	1,103		1,731	1,707	1,089	
19	1,692		2,380	2,130	1,449	
25	2,839		3,987	3,554	2,322	
32				3,768	3,380	
37,5				6,193	4,648	
51				8,680	7,736	
63,5				13,674	11,517	
76				18,432	16,263	

10

INDURA

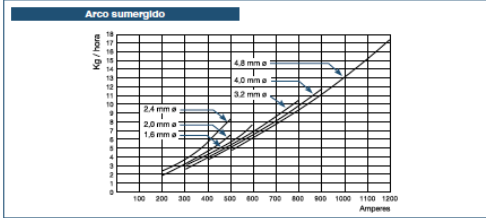
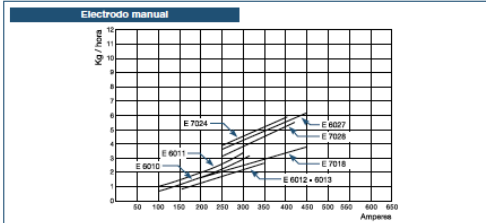
2. Eficiencia de aportación:

Relación entre el metal efectivamente depositado y la cantidad en peso de electrodos requeridos para efectuar ese depósito.

Proceso	Eficiencia deposición (%)
Electrodo manual	60-70
MIG sólido	90
MIG tubular c/protección	93
MIG tubular c/protección	79
TIG	95
Arco sumergido	98

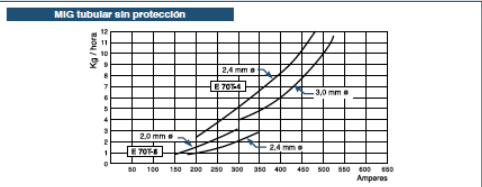
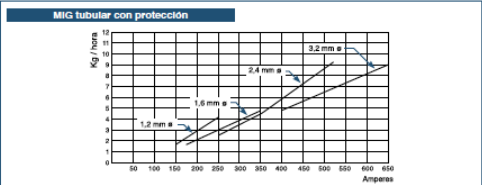
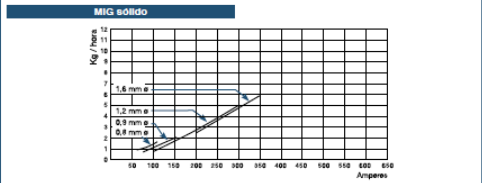
3. Velocidad de deposición:

Cantidad de material de aporte depositado en una unidad de tiempo.



11

TEMAS GENERALES DE SOLDADURA



12

INDURA

4. Factor de operación:

Se define como la relación entre el tiempo en que ha existido arco y el tiempo real o tiempo total pagado.

Proceso	Factor de Operación (%)
Electrodo manual	5- 30
MIG sólido	10- 60
MIG tubular	10- 60
TIG	5- 20
Arco sumergido	60-100

5. Flujo gas:

Cantidad de gas necesario para protección por unidad de tiempo.

Proceso	Flujo gas (m³/hr)
MIG sólido	0,8-1,2
MIG tubular	1,0-1,4
TIG	0,5-1,0

6. Factor de uso de fundente:

Cantidad de fundente efectivamente empleado por kg de alambre depositado.

Proceso	Factor de uso fundente (%)
Arco sumergido	80-100

En el diseño o fabricación de cualquier componente, hay tres consideraciones fundamentales que deben estar siempre presentes: EFICIENCIA, COSTO y APARENCIA.

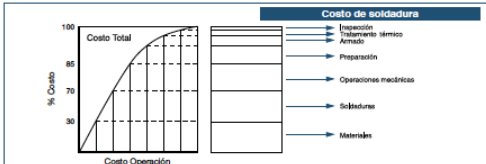
COSTO DE SOLDADURA:

Es especialmente importante, cuando es alto o cuando representa una proporción significativa del total estimado para un proyecto o un contrato. Como la soldadura está relacionada en forma directa a otras operaciones, nunca debe ser considerada y costada aisladamente. Cualquier operación de fabricación de productos incluye por lo general:

1. Abastecimiento y almacenamiento de materias primas.
2. Preparación de estos materiales para soldadura, corte, etc.
3. Armado de los componentes.
4. Soldadura.
5. Operaciones mecánicas subsiguientes.
6. Tratamientos térmicos.
7. Inspección.

Dado que cada una de estas operaciones representa un gasto, es posible representar la composición del costo total, como se indica en la figura.

En este ejemplo, el costo de material, costo de soldadura y operaciones mecánicas representan 30%, 40% y 15% respectivamente del costo total; el costo de las tres últimas operaciones constituye sólo un 15% del total. Es por lo tanto evidente, que la operación de soldadura misma es importante y debe ser adecuadamente costada y examinada en detalle, para determinar donde efectuar reducciones efectivas de costo.



13



TEMAS GENERALES DE SOLDADURA

Composición del costo de soldadura

Los principales componentes del costo de soldadura son:

- a) Costo de consumibles (electrodo, fundente, gases de protección, electricidad, etc.).
- b) Costo de mano de obra.
- c) Gastos generales.

Los dos primeros ítems son costos directos de soldadura. Sin embargo, gastos generales incluye numerosos ítems indirectamente asociados con la soldadura, como son: depreciación, mantenimiento, capacitación de personal, supervisión técnica, etc.

Costo de consumibles

Al considerar que existen numerosos procesos de soldadura y que cada uno tiene rendimientos diferentes, la cantidad total de consumibles que deben ser adquiridos varía considerablemente entre uno y otro.

La tabla siguiente indica los requerimientos de consumibles para varios procesos de soldadura:

Proceso	Eficiencia de deposición (%)	Pérdida por colillas (%)	Eficiencia electrodo (%)	Consumibles/ 100 kg metal depositado		
				Electrodo (kg)	Fundente (kg)	Gas (m³)
Electrodo manual celafósico	60	12	48	155	-	-
Electrodo manual rutílico	70-80	12	50-58	145-170	-	-
Electrodo manual bajo hidrógeno	72	12	60	160-170	-	-
Mig (corto circuito)	93	2	91	110	-	17-42
Mig (spray)	95	2	93	108	-	7-11
Tubular o protección	83	1	82	122	-	4-20
Tubular o protección	80	1	79	126	-	-
Arco sumergido	99	1	98	102	85-100	-

El único consumible cuyo costo no ha sido considerado es la energía eléctrica. Para todos los procesos de soldadura por fusión, puede ser considerado aproximadamente como 4.0 KW hr/kg de soldadura de acero depositado. Esto toma en cuenta la pérdida de energía

en el equipo, como también el máximo de carga KVA, y es por lo tanto un valor promedio.

Sin embargo, el costo de energía se puede determinar a través de la siguiente relación:

$$KW \text{ hora} = \frac{\text{Volts} \times \text{Amps} \times \text{Factor de potencia} \times \text{Tiempo en horas}}{1.000}$$

14

INDURA

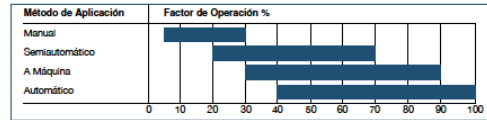
Costo mano de obra

Con excepción de ciertas aplicaciones semiautomáticas y automáticas, el costo de mano de obra, hoy en día, representa la proporción más significativa del costo total en soldadura.

El costo de mano de obra para producir una estructura soldada, depende de la cantidad de Soldadura necesaria, Velocidad de Deposición, Factor de Operación y Valor de Mano de Obra.

El factor de operación ha sido definido como la razón entre el tiempo real de arco y tiempo total que se paga al operador expresado en porcentaje. Así el intervalo de factores de operación, dependerá del proceso de soldadura y su aplicación.

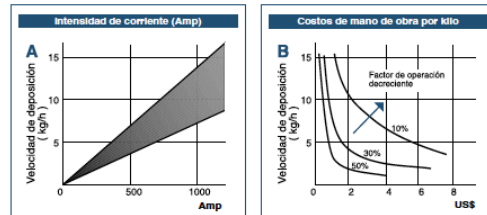
El diseño de la unión decide la cantidad de soldadura requerida y a menudo la intensidad de energía que se debe emplear al soldar. Sin embargo, los dos principales ítems que controlan los costos de mano de obra son velocidad de deposición y factor de operación.



La figura (A) muestra que la cantidad de deposición aumenta a medida que es elevada la corriente de soldadura. Esto se aplica generalmente a todos los procesos de Soldadura al Arco.

La figura (B) muestra las relaciones generales entre: velocidad de deposición y costo de mano de obra.

Además muestra que en cantidades altas de deposición, los costos de mano de obra por kilo de metal depositado tienden a disminuir.



15

TEMAS GENERALES DE SOLDADURA

POSICIONES EN SOLDADURA

Designación de acuerdo con ANSI/AWS A3.0:2001

Plano	Horizontal	Vertical	Sobrecabeza
Uniones de filete			
1F	2F	3F	4F
Uniones biseladas			
1G	2G	3G	4G
Uniones de tuberías			
La tubería se rota mientras se suelda		La tubería no se rota mientras se suelda	
1G	2G	5G	6G

16

INDURA

ESQUEMAS BÁSICOS

Esquemas Básicos de Soldadura

Tipos de unión			
Tipos de soldadura			
Variaciones de bisel			

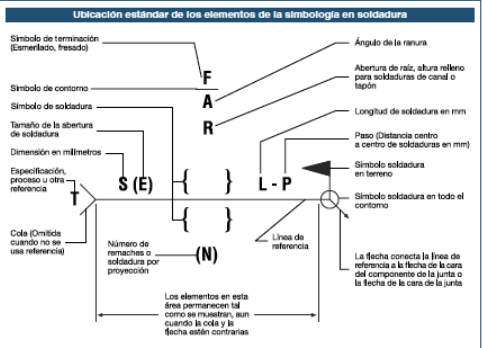
17

TEMAS GENERALES DE SOLDADURA

SIMBOLOGÍA EN SOLDADURA

La simbología en la especificación de trabajos de soldadura es una forma clara, precisa y ordenada de entregar información de operación. Existe para ello una simbología estándar que ha sido adoptada para la mayoría de los procesos de soldadura.

Una ilustración típica del uso y ventajas que representa la simbología se puede apreciar en la figura detallada a continuación, en la cual se muestra también una comparación con la explicación detallada. La ventaja es obvia.



TEMAS GENERALES DE SOLDADURA

SELECCIÓN DEL ELECTRODO ADECUADO

Para escoger el electrodo adecuado es necesario analizar las condiciones de trabajo en particular y luego determinar el tipo y diámetro de electrodo que más se adapte a estas condiciones.

Este análisis es relativamente simple, si el operador se habituó a considerar los siguientes factores:

1. Naturaleza del metal base.
2. Dimensiones de la sección a soldar.
3. Tipo de corriente que entrega su máquina soldadora.
4. En qué posición o posiciones se soldará.

5. Tipo de unión y facilidad de fijación de la pieza.
6. Si el depósito debe poseer alguna característica especial, como son: resistencia a la corrosión, gran resistencia a la tracción, ductilidad, etc.
7. Si la soldadura debe cumplir condiciones de alguna norma o especificaciones especiales.

Después de considerar cuidadosamente los factores antes indicados, el usuario no debe tener dificultad en elegir un electrodo INDURA, el cual le dará un arco estable, depósitos parejos, escoria fácil de remover y un mínimo de salpicaduras, que son las condiciones esenciales para obtener un trabajo óptimo.

ALMACENAMIENTO DE ELECTRODOS

Todos los revestimientos de electrodos contienen  $H_2O$ . Algunos tipos como los celulósicos requieren un contenido mínimo de humedad para trabajar correctamente (4% para un AWS E-6010). En otros casos, como en los de bajo hidrógeno, se requieren niveles bajísimos de humedad; 0,4% para la serie 70 (E-7018), 0,2% para la serie 80 (E-8018); 0,15% para las series 90, 100, 110 y 120 (E-9018, 11018, 11018 y 12018).

Este tema es de particular importancia cuando se trata de soldar aceros de baja aleación y alta resistencia, aceros templados y revenidos o aceros al carbono-manganeso en espesores gruesos.

La humedad del revestimiento aumenta el contenido de hidrógeno en el metal de soldadura y de la zona afectada térmicamente (ZAT). Este fenómeno puede originar fisuras en aceros que presentan una estructura frágil en la ZAT, como los mencionados anteriormente. Para evitar que esto ocurra se debe emplear electrodos que aporten la mínima cantidad de hidrógeno (electrodos de bajo hidrógeno, E-7018), y además un procedimiento de soldadura adecuado para el material base y tipo de unión (precalentamiento y/o postcalentamiento según sea el caso).

De todo lo anterior se puede deducir fácilmente la importancia que tiene el buen almacenamiento de los electrodos. De esto depende que los porcentajes de humedad se mantengan dentro de los límites requeridos y así el electrodo conserve las características necesarias para producir soldaduras sanas y libres de defectos.

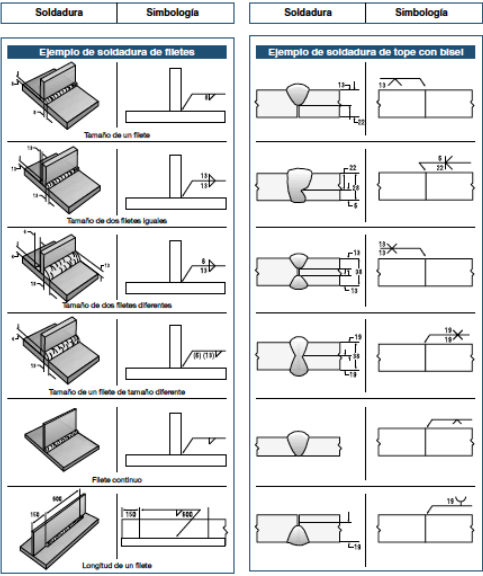
Como las condiciones de almacenamiento y reacondicionamiento son diferentes para los diversos tipos de electrodos, hemos agrupado aquellos cuyas características son semejantes, a fin de facilitar la observación de estas medidas.

Previamente definiremos los siguientes conceptos:

- a. Condiciones de almacenamiento:  
Son aquellas que se deben observar al almacenar en cajas cerradas. En Tabla I se dan las recomendaciones para el acondicionamiento de depósitos destinados al almacenamiento de electrodos.
- b. Condiciones de mantenimiento:  
Son las condiciones que se deben observar una vez que los electrodos se encuentran fuera de sus cajas. En Tabla I se indican estas condiciones.
- c. Reacondicionamiento o resacado:  
Aquellos electrodos que han absorbido humedad más allá de los límites recomendados por la norma requieren ser reacondicionados, a fin de devolver a los electrodos sus características. En Tabla II se indican las recomendaciones para el reacondicionamiento de electrodos.  
La operación de resacado no es tan simple como parece. Debe realizarse en hornos con circulación de aire. En el momento de introducir los electrodos

INDURA

En las siguientes figuras se muestran algunos ejemplos de las aplicaciones de la simbología de soldadura.



INDURA

en el horno, la temperatura del mismo no debe superar los 100°C y las operaciones de calentamiento y enfriamiento deben efectuarse a una velocidad de alrededor de 200°C/hr., para evitar la fisuración y/o fragilización del revestimiento.

Por último queremos entregar a nuestros clientes algunas recomendaciones sobre el uso de electrodos de bajo hidrógeno. Estas se encuentran indicadas en Tabla II y con una guía para el uso, que surge de la experiencia y de los resultados de distintas investigaciones.

Tabla I - Condiciones de almacenamiento y mantenimiento de electrodos

Electrodo		Acondicionamiento del depósito (en cajas cerradas)	Mantenimiento electrodos (en cajas abiertas)
Clase	Tipo		
E6011	Celulósico	Temperatura ambiente.	No recomendado.
E6012	Celulósico		
E6013	De rutilo (Fe)	Temperatura 16°C más alta que la temperatura ambiente, pero menor de 60°C, o humedad relativa ambiente menor a 50%.	10°C a 20°C sobre la temperatura ambiente.
E6014	De rutilo (Fe)		
E6024	De rutilo (Fe)		
E6016	Básico	Temperatura 20°C más alta que la temperatura ambiente, pero menor de 60°C, o humedad relativa ambiente menor de 50%.	30°C a 140°C sobre la temperatura ambiente.
E6018	Básico (Fe)		
E6048	Básico (Fe)		
E 7018 E 120	De rutilo o básico Básico		

Tabla II- Recomendaciones para el resacado de electrodos

Electrodo Tipo y Clase	Aplicación	Resacado
Celulósico (E6010 - E6011)	Todas	No requieren si han estado bien acondicionados. Por lo general no pueden resacarse sin deteriorar sus características operativas.
De rutilo (E6012-E6013) (E6014-E6024) inoxidables austeníticos	Todas	No requieren si han estado bien acondicionados. Caso contrario resacar 30 a 120 minutos a 100-150°C. Asociar la menor temperatura con el mayor tiempo. Durante el resacado ensayar en soldadura para comprobar características operativas y evitar sobrecalentamiento.
Básicos de bajo contenido de hidrógeno (E6015-E6016) (E6018-E6028) (E6048). Incluyen baja aleación (AWS A5.5), inoxidables martensíticos y ferríticos (E400)	Donde se requiere bajo contenido de hidrógeno en el metal depositado.  Aplicaciones críticas (aceros de alto contenido de carbono, aceros de baja aleación, aceros de más de 60 kg/mm <sup>2</sup> de resistencia).	Cuando el electrodo permaneció más de 2 hrs. sin protección especial, resacar 60 a 120 min. a 250-400°C. No exceder los 400°C, y si se seca a 250°C hacerlo durante 120 minutos.  Siempre antes de usar se resacan 60 a 120 min. a 300-400°C. No exceder los 400°C y si se seca a 300°C hacerlo durante 120 min. Luego conservar en estufa hasta el momento de soldar.

## TEMAS GENERALES DE SOLDADURA


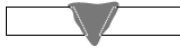

Tabla III- Recomendaciones para el uso de electrodos de bajo hidrógeno

Para soldadura normal de bajo contenido de hidrógeno, con control razonable de nivel de hidrógeno y precauciones rutinarias de calor aportado y precalentamiento.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Electrodos en envases no herméticos o dañados y electrodos que han sido expuestos a atmósfera normal por más de 2 hrs. deben ser resecados antes de usarse.</li> <li>2. Electrodos en envases no herméticos pueden usarse sin resaca para la soldadura de aceros de menos de 50 kg/mm<sup>2</sup> de resistencia en situaciones de bajo embriamiento o cuando la experiencia muestra que no ocurren fisuras.</li> <li>3. Los electrodos deben mantenerse en termos de 30°C a 140°C sobre la temperatura ambiente.</li> </ol>
Para soldadura crítica de bajo contenido de hidrógeno, con extremo control de nivel de hidrógeno, en estructuras importantes y materiales de alto carbono o baja aleación con resistencia mínima mayor de 50 kg/mm <sup>2</sup> .	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Siempre deben resacarse los electrodos antes de usar.</li> <li>2. Los electrodos deben mantenerse en termos de 30°C a 140°C sobre temperatura ambiente.</li> <li>3. Los electrodos resacados expuestos por más de 1 hr. a atmósfera normal deben volver a resacarse.</li> </ol>
Para soldadura general, donde se usan los electrodos por sus buenas propiedades mecánicas o calidad radiográfica, pero no se requiere un nivel bajo de hidrógeno en el metal depositado.	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Los electrodos pueden utilizarse directamente a partir de cualquier tipo de envase, siempre que hayan permanecido almacenados en buenas condiciones.</li> </ol>

22

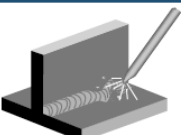


## INDURA

## PROBLEMAS Y DEFECTOS COMUNES EN LA SOLDADURA AL ARCO

DEFECTOS	CAUSAS Y SOLUCIONES
<b>Mal aspecto</b> 	<b>Causas probables:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Conexiones defectuosas.</li> <li>2. Recalentamiento.</li> <li>3. Electrodo inadecuado.</li> <li>4. Longitud de arco y amperaje inadecuado.</li> </ol> <b>Recomendaciones:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Usar la longitud de arco, el ángulo (posición) del electrodo y la velocidad de avance adecuados.</li> <li>2. Evitar el recalentamiento.</li> <li>3. Usar un valvén uniforme.</li> <li>4. Evitar usar corriente demasiado elevada.</li> </ol>
<b>Penetración excesiva</b> 	<b>Causas probables:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Corriente muy elevada.</li> <li>2. Posición inadecuada del electrodo.</li> </ol> <b>Recomendaciones:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Disminuir la intensidad de la corriente.</li> <li>2. Mantener el electrodo a un ángulo que facilite el llenado del bisel.</li> </ol>
<b>Salpicadura excesiva</b> 	<b>Causas probables:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Corriente muy elevada.</li> <li>2. Arco muy largo.</li> <li>3. Soplo magnético excesivo.</li> </ol> <b>Recomendaciones:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Disminuir la intensidad de la corriente.</li> <li>2. Acortar el arco.</li> <li>3. Ver lo indicado para "arco desviado o soplado".</li> </ol>




23

## TEMAS GENERALES DE SOLDADURA

DEFECTOS	CAUSAS Y SOLUCIONES
<b>Arco desviado</b> 	<b>Causas probables:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. El campo magnético generado por la CC produce la desviación del arco (soplo magnético).</li> </ol> <b>Recomendaciones:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Usar CA.</li> <li>2. Contrarrestar la desviación del arco con la posición del electrodo, manteniéndolo a un ángulo apropiado.</li> <li>3. Cambiar de lugar la grampa a tierra.</li> <li>4. Usar un banco de trabajo no magnético.</li> <li>5. Usar barras de bronce o cobre para separar la pieza del banco.</li> </ol>
<b>Soldadura porosa</b> 	<b>Causas probables:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Arco corto.</li> <li>2. Corriente inadecuada.</li> <li>3. Electrodo defectuoso.</li> </ol> <b>Recomendaciones:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Averiguar si hay impurezas en el metal base.</li> <li>2. Usar corriente adecuada.</li> <li>3. Utilizar el valvén para evitar sopladuras.</li> <li>4. Usar un electrodo adecuado para el trabajo.</li> <li>5. Mantener el arco más largo.</li> <li>6. Usar electrodos de bajo contenido de hidrógeno.</li> </ol>
<b>Soldadura agrietada</b> 	<b>Causas probables:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Electrodo inadecuado.</li> <li>2. Falta de relación entre tamaño de la soldadura y las piezas que se unen.</li> <li>3. Mala preparación.</li> <li>4. Unión muy rígida.</li> </ol> <b>Recomendaciones:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Eliminar la rigidez de la unión con un buen proyecto de la estructura y un procedimiento de soldadura adecuado.</li> <li>2. Precalentar las piezas.</li> <li>3. Evitar las soldaduras con primeras pasadas.</li> <li>4. Soldar desde el centro hacia los extremos o bordes.</li> <li>5. Seleccionar un electrodo adecuado.</li> <li>6. Adaptar el tamaño de la soldadura de las piezas.</li> <li>7. Dejar en las uniones una separación adecuada y uniforme.</li> </ol>

24

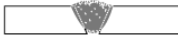


## INDURA

DEFECTOS	CAUSAS Y SOLUCIONES
<b>Combadura</b> 	<b>Causas probables:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Diseño inadecuado.</li> <li>2. Contracción del metal de aporte.</li> <li>3. Sujeción defectuosa de las piezas.</li> <li>4. Preparación deficiente.</li> <li>5. Recalentamiento en la unión.</li> </ol> <b>Recomendaciones:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Corregir el diseño.</li> <li>2. Mantilar (con martillo de peña) los bordes de la unión antes de soldar.</li> <li>3. Aumentar la velocidad de trabajo (avance).</li> <li>4. Evitar la separación excesiva entre piezas.</li> <li>5. Fijar las piezas adecuadamente.</li> <li>6. Usar un resaca enfriador.</li> <li>7. Adoptar una secuencia de trabajo.</li> <li>8. Usar electrodos de alta velocidad y moderada penetración.</li> </ol>
<b>Soldadura quebradiza</b> 	<b>Causas probables:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Electrodo inadecuado.</li> <li>2. Tratamiento térmico deficiente.</li> <li>3. Soldadura endurecida al aire.</li> <li>4. Enfriamiento brusco.</li> </ol> <b>Recomendaciones:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Usar un electrodo con bajo contenido de hidrógeno o de tipo austenítico.</li> <li>2. Calentar antes o después de soldar o en ambos casos.</li> <li>3. Procurar poca penetración dirigiendo el arco hacia el orillar.</li> <li>4. Asegurar un enfriamiento lento.</li> </ol>
<b>Penetración incompleta</b> 	<b>Causas probables:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Velocidad excesiva.</li> <li>2. Electrodo de Ø excesivo.</li> <li>3. Corriente muy baja.</li> <li>4. Preparación deficiente.</li> <li>5. Electrodo de Ø pequeño.</li> </ol> <b>Recomendaciones:</b> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Usar la corriente adecuada. Soldar con lentitud necesaria para lograr buena penetración de raíz.</li> <li>2. Velocidad adecuada.</li> <li>3. Calcular correctamente la penetración del electrodo.</li> <li>4. Elegir un electrodo de acuerdo con el tamaño de bisel.</li> <li>5. Dejar suficiente separación en el fondo del bisel.</li> </ol>

25



## TEMAS GENERALES DE SOLDADURA

DEFECTOS	CAUSAS Y SOLUCIONES
<b>Fusión deficiente</b> 	<p><b>Causas probables:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Calentamiento desigual o irregular.</li> <li>2. Orden (secuencia) inadecuado de operación.</li> <li>3. Contracción del metal de aporte.</li> </ol> <p><b>Recomendaciones:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Puntar la unión o sujetar las piezas con prensas.</li> <li>2. Conformar las piezas antes de soldarlas.</li> <li>3. Eliminar las tensiones resultantes de la laminación o conformación antes de soldar.</li> <li>4. Distribuir la soldadura para que el calentamiento sea uniforme.</li> <li>5. Inspeccionar la estructura y disponer una secuencia (orden) lógica de trabajo.</li> </ol>
<b>Distorsión (deformación)</b> 	<p><b>Causas probables:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Calentamiento desigual o irregular.</li> <li>2. Orden (secuencia) inadecuado de operación.</li> <li>3. Contracción del metal de aporte.</li> </ol> <p><b>Recomendaciones:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Puntar la unión o sujetar las piezas con prensas.</li> <li>2. Conformar las piezas antes de soldarlas.</li> <li>3. Eliminar las tensiones resultantes de la laminación o conformación antes de soldar.</li> <li>4. Distribuir la soldadura para que el calentamiento sea uniforme.</li> <li>5. Inspeccionar la estructura y disponer una secuencia (orden) lógica de trabajo.</li> </ol>
<b>Socavado</b> 	<p><b>Causas probables:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Manejo defectuoso del electrodo.</li> <li>2. Selección inadecuada del tipo de electrodo.</li> <li>3. Corriente muy elevada.</li> </ol> <p><b>Recomendaciones:</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. Usar valvén uniforme en las soldaduras de tope.</li> <li>2. Usar electrodo adecuado.</li> <li>3. Evitar un valvén exagerado.</li> <li>4. Usar corriente moderada y soldar lentamente.</li> <li>5. Sostener el electrodo a una distancia prudente del plano vertical al soldar filetes horizontales.</li> </ol>

26

## INDURA

## ELECTRODOS INDURA

Composición química (valores típicos)

Aplicación	Clasificación AWS	Electrodo INDURA	Corriente	Composición Química (%) del metal depositado (valores típicos)									
				C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	W	Otros
Acero al carbono	E6010 / E6110	6010	CC	0,11	0,55	0,24	0,008	0,014					
	E6011 / E6111	235-G	CA-CC	0,08	0,51	0,29	0,013	0,012					
	E6011 / E6111	6011	CA-CC	0,11	0,41	0,25	0,010	0,017					
	E6011 / E6111	Punto Azul	CA-CC	0,11	0,57	0,24	0,012	0,020					
	E6011 / E6111	Punto Verde	CA-CC	0,11	0,59	0,25	0,017	0,020					
	E6012 / E6112	6012	CA-CC	0,08	0,50	0,25	0,018	0,019					
	E6013 / E6113	6013	CA-CC	0,11	0,40	0,20	0,015	0,010					
	E6013 / E6113	90	CA-CC	0,11	0,47	0,24	0,015	0,018					
	E7014 / E6114	Faciliter 14	CA-CC	0,07	0,68	0,55	0,018	0,020					
	E7018 / E6118	7018 RH	CC	0,08	1,35	0,48	0,015	0,010					
	E7018 / E6118	7018-AR	CC	0,08	1,05	0,55	0,020	0,015					
	E7024 / E6124	Faciliter 12	CA-CC	0,08	0,88	0,55	0,020	0,011					
Acero de baja aleación	E7018-A1	7018-A1	CC	0,11	0,50	0,28	0,010	0,009	0,05	0,04	0,05		
	E7018-A1	7018-A1	CC	0,05	0,67	0,86	0,013	0,010	0,05	0,06	0,01		
	E7018-G	7018-RG	CC	0,04	0,63	0,15	0,022	0,009	0,08	0,08	0,02		0,60 Cu
	E8018-80	8018-80	CC	0,08	0,57	0,50	0,012	0,009	1,14	0,07	0,08		
	E8018-88	8018-88	CC	0,05	0,78	0,79	0,021	0,007	5,24	0,18	0,47		
	E8018-88	8018-88	CC	0,08	0,98	0,41	0,012	0,006	10,32	0,21	1,17		
	E8018-C1	8018-C1	CC	0,04	0,54	0,26	0,015	0,009	0,06	2,40	0,32		
	E8018-C2	8018-C2	CC	0,05	1,15	0,51	0,004	0,006	0,02	3,79	0,004		
	E8018-C3	8018-C3	CC	0,05	1,11	0,41	0,015	0,008	0,04	0,06	0,21		
	E8018-W2	8018-W2	CC	0,04	1,07	0,39	0,014	0,006	0,01	0,70	0,02		0,40 Cu
	E8018-82	8018-82	CC	0,05	0,98	0,55	0,012	0,009	2,31	0,06	1,38		
	E8018-M	8018-M	CC	0,05	0,86	0,42	0,012	0,010	0,10	1,42	0,24		
	E1018-M	1018-M	CC	0,04	1,54	0,32	0,013	0,010	0,30	1,86	0,40		
Acero inoxidable	E308-16 / E308H-16	308/308H	CA-CC	0,05	0,54	0,67	0,021	0,005	18,7	10,2	0,07		
	E308L-16	308L	CA-CC	0,02	0,63	0,78	0,005	0,006	18,7	10,0	0,18		
	E309L-16	309L	CA-CC	0,02	0,69	0,80	0,022	0,009	22,5	18,4	0,18		
	E309LMo-16	309LMoL	CA-CC	0,02	0,73	0,51	0,018	0,010	23,3	12,5	2,38		
	E310-16	25-20	CA-CC	0,13	1,25	0,71	0,021	0,008	25,8	21,4	0,10		
	E312-16	29-6-5	CA-CC	0,11	0,37	0,69	0,028	0,008	29,0	16,1	0,25		
	E316-16	316	CA-CC	0,02	0,63	0,77	0,022	0,009	16,5	11,7	2,70		
	E316-16 / E316H-16	316/316H	CA-CC	0,05	1,20	0,80	0,020	0,020	18,7	12,0	2,30		
	E347-16	347	CA-CC	0,03	0,78	0,90	0,082	0,005	18,5	10,0	0,25		0,40 Nb
	E321Mo-16	15-4	CC	0,04	0,46	0,29	0,019	0,011	11,5	4,1	0,46		
	E2209-16	2209	CA-CC	0,03	1,01	0,38	0,011	0,013	22,9	16,1	3,00		
	E2209-16	2209	CA-CC	0,03	0,94	0,17	0,014	0,004	16,38	Balance	0,02	0,08% 7,25% Fe	
	E2209-16	2209	CA-CC	0,05	0,85	0,45	0,020	0,010	21,60	Balance	0,02	0,08% 4,35% Fe	
Ni y sus aleaciones	ENiCrFe-9	Nicroalloy 95	CA-CC	0,05	0,54	0,17	0,014	0,004	16,38	Balance	0,02	0,08% 7,25% Fe	
	ENiCrMo-9	Nicroalloy 9	CA-CC	0,05	0,85	0,45	0,020	0,010	21,60	Balance	0,02	0,08% 4,35% Fe	
	ENiCrFe-9	Nicroalloy 95	CA-CC	0,05	0,54	0,17	0,014	0,004	16,38	Balance	0,02	0,08% 7,25% Fe	
Hierro Fundido	E-NC3	Nical 99	CA-CC	0,74	0,18	0,11	0,006	0,003	0,10	Balance	0,02	2,75% Fe	
	E-NFe-C1	Nical 55	CA-CC	0,01	0,54	0,13	0,015	0,002	0,53	Balance	0,02	46% Fe	
	E-Fe	77	CA-CC	0,10	0,43	0,08	0,015	0,010	0,10	Balance	0,02	Balance Fe	
Cu y sus aleaciones	ECuAl-A	70	CC						6,0 Sn, 0,25 Pb, 0,10 Si, 0,10 P	Balance Cu			
	E-Falco-A	Trimag	CA-CC	0,78	14,47	0,19	0,020	0,003	4,18	2,50	0,02		

Referència 3. Normativa colòs ogives de les ampolles de gasos industrials.

Se establece un nuevo sistema de códigos de colores para la identificación del riesgo asociado al contenido de una botella de gas (tóxico, y/o corrosivo, inflamable, oxidante, inerte).

**Manipulación, transporte y utilización de las botellas**

La etiqueta es el primer y principal soporte indicativo del contenido de una botella. La etiqueta recoge las informaciones obligatorias en relación al gas de la botella. Los textos y símbolos de la etiqueta se elaboran de acuerdo con la legislación vigente.

Si no es posible acercarse a una botella, la identificación por el color de la ojiva es un método complementario de información.

**SIEMPRE HAY QUE CONSULTAR LA ETIQUETA**

**Contacto**

AL Air Liquide España, S.A.  
Paseo de la Castellana, 35  
28046 Madrid  
Tel.: 91 502 93 00

Creado en 1902, Air Liquide, líder mundial en gases industriales y medicinales y servicios asociados, está presente en más de 75 países y cuenta con 4300 colaboradores. Gracias a reducciones innovadoras basadas en las últimas tecnologías, Air Liquide contribuye a la fabricación de múltiples productos de nuestro día a día, así como a la mejora de la calidad de vida y al cuidado del medio ambiente.

**AIR LIQUIDE**  
www.airliquide.com

**Nueva norma de colores de botellas de gas**

**Principios**

- La fase de transición durará hasta Agosto de 2014. Durante este periodo, los dos sistemas de identificación por colores convivirán.
- El color del riesgo queda recogido en la parte superior de la botella (ojiva).
- Todos los gases industriales tendrán una ojiva monocolor que identifica el riesgo principal del gas.
- Para los gases medicinales y respirables, se aplica un color específico para cada gas excepto en el caso de mezclas.
- Las ojivas de las botellas con los nuevos colores tendrán pintadas dos letras N (nuevo) marcadas en dos lugares contrapuestos.
- El color de la parte interior de la botella (cuerpo) es de libre aplicación y no se identifica con riesgos, pudiendo ser elegido por el fabricante a condición de que no genere confusión con los colores de riesgo.
- Esta norma no aplica a los extintores ni a los gases licuados del petróleo.

**Nueva norma de colores de botellas de gas**

Regla general		
Color de riesgo	Antiguo sistema	Nuevo código europeo
Tóxico/corrosivo	Verde (u otro)	Amarillo
Inerte (argón y mezclas)	Amarillo o mezcla de colores	Verde intenso Verde oscuro
Inflamable	Rojo (u otro)	Rojo
Oxidante	Bianco (u otro)	Azul claro

**¡Atención!**  
Los racores de salida no varían.

Este documento ha sido elaborado por Air Liquide España para dar a conocer la normativa aplicable a los colores de las botellas. Esta información constituye un resumen y por tanto no exime del conocimiento completo de la norma. En cualquier caso, Air Liquide no se responsabiliza de la interpretación que los usuarios pudieran hacer de la misma y recomienda que se conozca la norma citada en profundidad. Para mayor detalle rogamos se dirija a su contacto comercial de Air Liquide. Rogamos distribuyan esta información entre las personas de su organización que trabajen con botellas de gases.

**Lo que cambia**

Gases Industriales			
	Antes	Después	
Argón	Amarillo	Verde oscuro	Amoníaco Cloro
Kriptón Neón Xenón	Marrón	Verde intenso	Monóxido de nitrógeno Anilina Fluor Fosfina Dióxido de azufre
Acetileno	Marrón	Marrón feja	

Mezclas Industriales			
	Antes	Después	
Mezclas tóxicas Beverán	Amarillo		
Mezclas inflamables Beverán	Rojo		
Mezclas Oxidantes Beverán	Azul claro		
Mezclas Inertes Beverán	Verde intenso		

**Lo que no cambia**

Los gases habituales que no cambian son:			
	Antes	Después	
Oxígeno	Bianco	Dióxido de carbono	Gris
Nitrógeno	Negro	Óxido nítrico	Azul
Hidrógeno	Rojo	Helio	Marrón

**Nuevos colores de las ojivas de las garmas de gases de Air Liquide**

Lasal 201, amoníaco, CO
Mezcla alimentaria 210, Argal 330, Argal 27, Alphagaz mix O2-CO2
Argal 11, Argal 15, Noxal 4, Noxal 6, Formigas 15, eleno, etano, propano, propano, isobutano, isobutano, butano, metano, mezcla G21, Alphagaz-Mix Ar-C4H 90/10, Alphagaz-Mix Ar-H2 95/5, Alphagaz-Mix He-H2 60/40, Mezcla B10 15, Mezcla B10 10
Mezcla Ar-CO2, Argal 10, Argal 12, Argal 14, Argal 21, Argal 22, Argal 31, Argal 32, Argal 35, Argal 37, Argal 39, Argal 112, Argal 121, Argal 125, Argal Mez, Argon Mix 2, Argon Mix 3, Cargal 4, Alal 15, Alal 20, Ar-CO2, Argal 62, Alal 25, Mezcla Ar-He, Argal 12, Argal 13, Argal 14, Argal 15, Formigas 5, Acetil, Lasal 38, Lasal 53, Lasal P51, Lasal 68, Lasal P73, Lasal 78, Lasal 81, Lasal 82, Lasal 83, Alphagaz 1 Aire, Alphagaz 2 Aire, Alphagaz Auto IV Aire, Alphagaz Mix Ar-C4H 95/5, Alphagaz-Mix Ar-H2 95/2, 5/8
Argón, Argal 6, Argal Tig-Mig, Argal 1, Alphagaz-1 Argón, Alphagaz-2 Argón

**Nuevos colores de los cuerpos de las botellas**

Gama de gases de alimentación Argal
Gama Argal, Lasal, Flamal, Alphagaz y grifos Altop y Smartop

Documento disponible para su impresión en la web [www.airliquide.es](http://www.airliquide.es)

Referència 4. Material híbrid Malecon©.

## **New Fiber-Metal Hybrid Laminated Material (MALECON)**

Juan C. Suárez, Miguel A. Herreros

*Research Group on Hybrid Materials.*

*Naval Architecture and Shipbuilding Department.*

*Universidad Politécnica de Madrid. Avda. Arco de la Victoria, s/n.*

*28040 Madrid, Spain.*

[juancarlos.suarez@upm.es](mailto:juancarlos.suarez@upm.es)

### **Abstract**

For the next generation of ships, the Navy is looking to stealthier hull technologies, specifically those which create lower magnetic, acoustic, hydrodynamic, radar, and thermal signatures. This calls for new materials for combatant vessels, capable of satisfying all these design and fabrication requirements for lighter structures that are in turn more resistant, permit higher speeds of movement and lower energy consumption. Steel has a series of limitations that impede continued improvement in the line of constructing light, resistant and safe structures. Composite materials are light and resistant, but the manufacturing processes are more labor-intensive and costly; in addition they are very sensitive to damage from impact and can present problems of degradation of their mechanical properties through water absorption. Fiber-metal hybrid materials combine the high resistance to impact and durability, and the versatile manufacturing of metals with a specific strength and stiffness in the direction of the fiber, as well as good resistance to fatigue, characteristics of the composites. *Malecón*® is a new hybrid multilayered material formed by layers of metal alternating with others of composite and structural adhesives, with improved in-service performance. We hold a patent on this material and its manufacturing system, and international extensions to more than thirty countries are already in due course.

### **Introduction**

The structural material used for the building of combatant vessels has been traditionally plain carbon steel. This material has some well-known advantages when confronted to other alternative materials: low cost; easiness for shaping and machining; good weldability; its behavior and properties have been studied in depth and are well understood; it is very tough and with high impact strength. However, there are some others undesirable aspects for its use in shipbuilding: a remarkably high density, and a corrosion velocity that requires the use of expensive methods for its prevention. High speed ships are weight-sensitive structures, and lightness is a must both for increased velocity and efficient energy consumption. The fabrication processes for welded steel hulls introduce large residual stresses, which lead to large deformations of the individual plates (known as dishing.) Multiple dished plates along the side of the ship are usually referred to as hungry horse deformation, similar to the exposed ribcage of a starving horse. The RCS of the hull is increased by the multiple concave surfaces diffracting radar signals, thus magnifying overall signature. They also reduce fatigue life under repeated cyclic load, also called panting. Stainless steel hulls are expected to result in much higher residual stresses and hence dishing deformations will be larger. The only means to assure tight manufacturing tolerances is to relieve the residual stresses by heat treatment (which is very expensive), or to use some advanced welding technology that could minimize the residual stresses. In some steel hulls, designers resorted to increasing the steel thickness (thus adding weight) to reduce hungry horse deformation.

The alternative structural materials so far proposed for ship construction have been: high tensile steels, high strength aluminum alloys, and composite materials. High tensile steels have been used because of their higher strength and stiffness as compared to the plain carbon steels, allowing the building of lighter structures; on the other hand, are more difficult to weld and prone to fracture. High strength aluminum alloys have a smaller density, but they are less stiff than the equivalent sections made of steel, so the final weight of the structure is no reduced as much as one could imagine comparing only the densities of aluminum and steel (more stiffeners and thicker plates are required); these alloys are much more difficult to be weld and, even those designed specifically to be used in marine environment, suffer from corrosion-fatigue problems. Composite materials used for shipbuilding (FRP) have a quite high specific strength, however: manufacturing process is more expensive; impact strength is worse as compared with metallic materials; there are problems of water absorption (osmosis) that diminish the mechanical properties of the material, and fire safety (so important for all kind of vessels but specially for passenger ships) is deeply impaired. As a result of all these considerations, the alternative materials have not been able to displace the use of steel as the main structural material for shipbuilding. They have only obtained a minor use restricted to very specific applications.



Fig.1. *Malecón*®: a new hybrid multilayered material formed by layers of metal alternating with others of composite and structural adhesives.

Several studies have shown that for hulls longer than about 60 m, even carbon fiber composites would not provide the required stiffness and strength required for a hull. composites lack both the stiffness and the in-plane strength required for the larger combatant ship hulls. The structures of long Navy combatants carry loads by the alternating axial tension and compression the hull experiences during hogging (hull bows up) and sagging (hull bows down) modes, the result of traversing waves at sea. Therefore, for long structures the in-plane strength of the composite becomes the critical design factor. For small ships the bending strength (and not the in-plane strength) of the composite is the critical design factor. The composite sandwich construction technology common in smaller ships or boats, cannot provide the necessary in-plane strength for sea loads in long ship hulls.

The implementation of new materials specifically designed for shipbuilding, and a not mere application of materials coming from other industries, will eventually satisfy the increasing requirements towards modern ships. Our proposal is the development and implementation of a new structural material, specifically designed to be used in shipbuilding, that overcome the problems linked to the use of steel, but keeping most of its great values, and, at the same time, not introducing additional problems, as those already mentioned for some alternative materials. Our approach for this new material is based in the so called Fiber Metal Hybrid Laminates. This kind of material is formed by layers of metal sheet alternating with plies of composite material. For our purposes, metal will be steel, and we will use plies of vinyl ester reinforced with glass fibers. We obtain a

multilayered material with improved in-service performance. The most compelling reasons to use hybrid materials in ships are stealth, lower total ownership cost, and weight reduction. Since construction with hybrid materials is more expensive than with steel, designers need to show a clear advantage to composites and a means to achieve cost savings over steels, either in initial construction costs or in total life cycle costs:

- The material is lighter than steel due to a partial substitution with the lighter FRP, and the amount of reduction in weight is adjustable just controlling the percentage of FRP used.
- We can design the new material to be isotropic or anisotropic, with reinforced properties in certain preferential directions.
- Fatigue behavior can be improved due to the multilayer concept, provide that the nature and strength of the interface between the metal and the polymer would be properly tuned.
- Corrosion could affect to the most external metal sheet, but once it arrives to the reinforced polymer the degradation is more efficiently controlled.
- Impact strength is better than in the case of composite materials because the external face is still a metal, with its high toughness and plasticity, but it is also possible to use intermediate layers specifically suited to resist shock waves.
- Fire safety is improved because after the first metallic sheet the heat find a glassy material (after the polymer has burnt out) with a refractory behavior, that retard the propagation of fire. Polymer is encapsulated between metal sheets.
- It is possible to get a substantial noise damping, as compared with steel or aluminium, by introducing some layers of sound adsorbing materials.
- Manufacturing is still less versatile than the processes used for metals, but it is improved if we compare it with the composite materials, because metal sheets act as moulds as the curing proceed.
- Joining techniques are conveniently improved, combining adhesive joints for the inside layers with welding for the outer sheets.

Hybrid material allows for low maintenance, elimination or reduction of corrosion problems, light weight, ability to use low cost/high performance composites, as well as embedded sensors and fiber optics for health monitoring, and also reduce repair costs through the use of removable panels. This type of materials eliminates the problem of an entire hull delamination, which could result from the ship impacting ice, piers, or other hard objects. Combatants vessels with hybrid construction have the following advantages: superior performance in underwater explosions (UNDEX) with reduction in whipping loads<sup>1</sup>; the hybrid hull is perceived to be less vulnerable to internal explosions, because the outer metallic skin would allow relief of internal blast pressure preventing extreme loading of the structural frame; the use of low density composites saves weight, allowing for added additional protection systems; the hybrid material provides options to reduce structural acoustic signatures.

Alternative approaches have been followed in two different directions: hybrid hull design and sandwich materials. Several hybrid hull designs have been proposed. Hybrid hull design combines a mid-section of stainless steel advanced double hull and bow and stern sections made of single skin cross-reinforced composite or sandwich composite. Other option is an all-composite skin along the entire hull reinforced with stainless steel framing in the mid-section. A detailed finite element analysis of whipping shows that for a hybrid hull the highest stressed region is at the joints due to

---

<sup>1</sup> Whipping loads are created when the length of the vessel bends upward and downward repetitively due to an underwater explosion. While similar to routine sea loading, the magnitude of the bending and the rate are much greater during whipping.

the material mismatch. On the other hand, sandwich materials like *Metawell* and *SPS (Sandwich Plate System)* use low stiffness core materials and the in-plane resistance is accordingly not enough for large vessels. Thus far, *Malecón*® is the only alternative that offers a hybrid material approach with a proper in-plane stiffness for new ship building, and not only for repairs.

#### ***Malecón*® Panel Production**

The fiber-metal hybrid laminated material for naval construction is comprised of steel sheets and laminates of a composite material comprised by a polymer matrix reinforced with glass fibers. The amount, thickness and orientation of each of these sheets and laminates are calculated in order to obtain the appropriate stiffness and strength in each area of the ship. The composition of the laminate can vary in order to adapt the design material to the structural needs of each area of the ship or marine device. However, it is necessary to abide by a series of premises in the design of the material. The more external layers will always be of steel. In this way, it takes advantage of its resistance to impact, protecting the composite material that is located in the interior of the sandwich for possible delamination and microcracking. It also takes advantage of its capacity of supporting higher temperatures than the polymeric matrix of the compound, with a minor loss of mechanical properties and without smoke emission during a possible fire. Inside, other layers of steel can be placed to increase the stiffness of the hybrid material. The composite laminates are always situated in the interior of the sandwich formed by the external sheets of steel. The preferred materials are those that have been demonstrating their good performance in marine environments: polyester or vinyl ester matrix and reinforcement of continuous E-fiberglass. The fiber can be used in the form of fabric or as unidirectional reinforcement, depending on the preferred directions that are to be reinforced according to the principal directions of the stresses in service. The composite laminates will be grouped in packs with a determined number of layers, always between two steel sheets. The bond between the plies in the composite material laminate, within each package of the hybrid material, is done by means of the adhesion capacity of the polymeric resin that makes up the matrix. The bonds between the composite material core and the metallic sheets are done by using a structural adhesive. This adhesive is placed, at least, between the most external steel sheets and the first pack of composite material, where the interlaminar stresses can reach high levels. The adhesive must be elastic, have a certain capacity of reversible distortion, in order to absorb the difference of mechanical properties of the metal and the composite during bending without breaking. An adhesive of the bi-component polyurethane type is appropriate for this purpose. However, the thickness of the adhesive layer must be controlled (according to the recommendations of each manufacturer for the type of adhesive selected) in order to adapt to the differences of strain without reaching a thicknesses that would cause premature failure of the adhesive bond.

The panels of fiber-metal hybrid laminated material can be flat or curved, in order to be used in different areas of the naval structures and marine devices. The steel sheet, either flat or with the curvature that has been given to it, serves as a mould for the placement of the successive layers of composite material, with which no additional tooling is needed to fabricate the laminate, as is usual in the lay-up of conventional composite materials. Some auxiliary elements are used for the precise placement of the laminates and to hold them in position –acting as stoppers– during the curing and consolidation process of the polymeric matrix, but not an actual mould. The reinforcement is used dry, placed on the steel sheet that acts as a mould and the resin is introduced using vacuum infusion equipment.

In any case, it is essential to assemble the individual panels in order to make the desired structure. For this purpose, the panels are constructed leaving the borders in a staircase form on the four borders, so that the steps of one panel fit into those of the neighboring panel. An elastic adhesive is applied to bond the panels together. The adhesive bonded surface, which is the surface of the

assembled steps, must be sufficient to guarantee a perfect transmission by shearing of the loads from one panel to another. The exact dimensions of these steps are calculated based on the dimensions of the panels and the expected loads in service. The assembly adhesive must have, therefore, a certain capacity to fill gaps and to be able to absorb in this way the manufacturing tolerances.

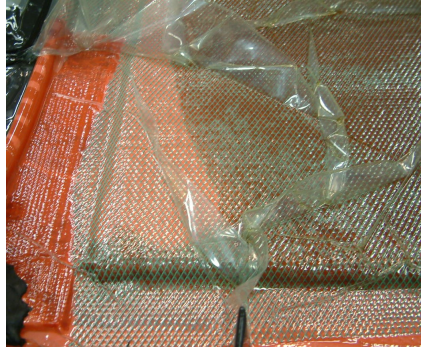


Fig.2. Vacuum infusion process for manufacturing of the hybrid laminate.

Once the assembly of the panels is done, it is necessary to seal the connections that are on the outside, on both surfaces of the hybrid laminate, and in lengthwise and crosswise directions. These connections do not contribute to the transfer of loads between panels but, above all, serve to impede the entrance of water in the interior of the laminate. The sealing can be done in two ways; either welding the steel sheets together or else using a polymeric sealant. In the case of welding, one must take into account that metal must be provided to fill the gap between the two sheets, trying to penetrate as little as possible so as not to damage the polymeric material that is found below. In the case of using a polymeric sealant, one will be chosen with the capacity to fill the gaps and bear the relative movement between the two sheets without failure. The sealant must impede the entrance of water in the interior of the material during the structure's service lifetime. Once the panels are assembled, they can be painted, following the usual procedures in order to protect the structure from the phenomena of corrosion.

#### **Material Development Test Program**

For developing this new structural material for shipbuilding, being a viable and realistic alternative to the traditional materials already in use, it has been necessary to take care of six specific goals:

1. Obtain a sound bonding between the metal and the polymeric matrix, with an adequate durability, according to the scheduled life in-service: interface with a proper strength to transmit shear stresses from one material to the other, but avoiding delaminations.

- Metal surface treatment
- Polymeric transition material to accommodate the properties of the dissimilar constituents
- Compatibility between the surface treatment and the interface

2. Develop a surface treatment adequate for the combination of materials to be joined, but feasible in the usual circumstances of shipbuilding: the working conditions in a shipyard are different from those found in a clean room for aerospace purposes; the goal is to obtain a treatment less sensitive to a dirty surface, humidity and temperature.

- Increase tolerance to dirty surfaces
- Increase tolerance to humidity
- Increase tolerance to temperature

3. Evaluation of the performance of the hybrid laminates using mechanical and environmental testing: before passing to prototype testing in a real ship, it has been necessary to fully characterize the mechanical and environmental response of the material using standard testing procedures.

- Stress-strain curve in tension and compression
- Shear yield strength
- Blunt notch strength
- Fatigue behavior
- Residual strength
- Damage tolerance aspects
- Degradation in marine environment

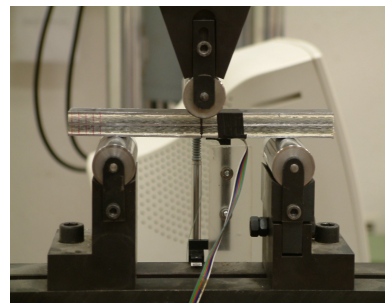


Fig.3. Bending test specimen and fixture

4. Accommodation of the design tools (finite elements) to obtain accurate prediction of performance for the new material: data from mechanical testing have to be used during numerical modeling, using finite elements, in order to validate the behavior of panels prior to testing in real conditions; new design strategies have to be addressed to obtain the maximum performances from this new material.

- Static strength of stiffened panels
- Buckling and post-buckling behavior
- Detailed design concepts
- Cut-outs design
- Numerical modeling
- Codes and Standardization



Fig.4. DMMB test specimen and fixture



5. Propose economically viable manufacturing processes: manufacturing of small specimens for testing does not guarantee that the same processes should be used for the manufacturing of bigger panels more adequate for shipbuilding; it has been necessary to explore valid solutions for manufacturing in the shipyard, especially new joining techniques suitable for these materials.

- Flat panels
- Curved panels
- Machineability
- New joining techniques: panel to panel; stiffener to panel



Fig.5. Assembly of curved panels

6. Safety, repair and maintenance issues: everything related with safety could be decisive to allow the extended use of this new material; also is important to explore topics related to repair and maintenance issues.

- Inspection and maintenance
- Fire safety
- Impact properties
- Corrosion
- Repairs
- Recycling

### Prototype testing

A test specimen was prepared in order to test the failure modes of flat subcomponents with four panels joined together. The four panels were constructed leaving the borders in a staircase shape, so that the steps of one panel fit into those of the neighboring panel, and were bonded using a structural adhesive.

The hybrid material flat specimen was mounted in a three-point bend fixture and loaded in compression along the central adhesion line. The specimen was instrumented with strain gages, for measuring strain in selected points, and variable differential transformers (LVDTs) to measure cross section deformation. In particular, the compression can lead to instability problems if the joint is not properly designed: local buckling of the outer sheet metal and global buckling of the panel. HBM *Spider 8* was utilized for the data acquisition of all signals from the strain gauges, while the LVDTs and the cell load were controlled by the testing machine software. Test data was recorded by three personal computers.

### Acknowledgements

This work was supported by UPM AM0402 and AS0801 grants.

### References

- [1] Suárez JC *et al*, Fibre-metal hybrid laminate material for shipbuilding and production method thereof, Spanish Patent 2261070 B2 ; 18 April, 2007 (WO/2006/103309)
- [2] Barsoum R. The best of both worlds: hybrid ship hulls use composites and steel. AMPTIAC Q 2003;7(3):55–61.
- [3] Barsoum R., Hybrid ship hull. US Patent 6,386,131; 14 May, 2002.
- [4] Stephen J. Kennedy ,U.S. Patent 5 778 813, Composite steel structural plastic sandwich plate systems; 14 July, 1998.
- [5] Stephen J. Kennedy , U.S. Patent 6 050 208, Composite structure laminate; 28 August 2007.
- [6] Suárez JC, López F, Miguel S, Pinilla P and Herreros M, Determination of the mixed-mode fracture energy of elastomeric structural adhesives: evaluation of debonding buckling in fiber-metal hybrid laminates, *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, (to be published)
- [7] Cao J, Grenestedt JL. Design and testing of joints for composite sandwich/steel hybrid ship hulls. *Composites A: Appl Sci Manuf* 2004;35:1091–105.
- [8] Thompson L, Walls J, Caccese V. Design and analysis of a hybrid composite/metal structural system for underwater lifting bodies. Department of Mechanical Engineering, University of Maine. Report no. UM-MACH-RPT-01-08, June 2005.
- [9] Jun Cao, Joachim L. Grenestedt, , William J. Maroun, Testing and analysis of a 6-m steel truss/ composite skin hybrid ship hull model, *Marine Structures* 19 (2006) 23–32